

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Электрооборудование системы управления электроцентробежным погружным насосом</b>

УДК 621.31-5:621.67:681.51.04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗБ2	Тикин Дмитрий Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШЭ, ОЭЭ	И.А. Чернышев	Кандидат технических наук, доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	С.Н. Попова	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОКД ИШНКБ	А.М. Ледовская			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель отделения	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, руководитель ОЭЭ	Ю.Н. Дементьев	PhD Доцент		

Томск – 2018 г.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель отделения ОЭЭ  
 \_\_\_\_\_ Ю.Н. Дементьев  
 (Подпись) (Дата) \_ (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5ГЗБ2	Тикин Дмитрий Николаевич

Тема работы:

<b>Электрооборудование системы управления электроцентробежным погружным насосом</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№856/с от 08.02.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы:	04.06.2018
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Планируемый дебит скважины: $Q = 75 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; Пластовое давление: $P_{\text{пл}} = 24 \text{ МПа}$ ; Давление насыщения: $P_{\text{нас}} = 5 \text{ МПа}$ ; Буферное давление: $P_{\text{буф}} = 2,5 \text{ МПа}$ . Глубина расположения пласта (отверстий перфорации): $L_{\text{скв}} = 2500 \text{ м}$ .
---------------------------------	---

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Технологический процесс. 2. Расчет мощности насоса и выбор асинхронного электродвигателя. 3. Описание и выбор системы управления ЭП. 4. Расчет схемы замещения и построение естественных и регулировочных характеристик АД. 5. Разработка и исследование имитационной модели «АД», «ПЧ-АД» в среде Matlab.
<b>Перечень графического материала</b>	1. Схема замещения АД. 2. Имитационные модели «АД», «ПЧ-АД». 3. Результаты исследований.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Попова Светлана Николаевна
«Социальная ответственность»	Ледовская Анна Михайловна

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	21.03.2018 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Игорь Александрович	Кандидат технических наук, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗБ2	Тикин Дмитрий Николаевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-5ГЗБ2	Тикин Дмитрий Николаевич

<b>Школа</b>	Инженерная школа энергетики	<b>Отделение</b>	Отделение электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску. Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	50 % доплата и надбавка; 30 % районный коэффициент; 15% дополнительная плата; 16% накладные расходы.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30,2 %.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ конкурентных технических решений. исследования внешней и внутренней среды проекта на основе SWOT-анализа.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: -определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка диаграммы Ганта. Формирование затрат на проектирование: -заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы. Формирование сметы реализации технического проекта: - стоимость оборудования и комплектующих; -стоимость материалов для монтажа и установки; - стоимость монтажа
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение ресурсоэффективности проекта.

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
3-5ГЗБ2	Тикин Дмитрий Николаевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-5ГЗБ2	Тикин Дмитрий Николаевич

<b>Школа</b>	Инженерная школа энергетики	<b>Отделение</b>	Отделение электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Электропривод скважинного нефтяного электроцентробежного насоса системы «ПЧ-АД».
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</li> </ul>	<p><b>1.1. Анализ вредных факторов при разработке и эксплуатации электропривода УЭЦН</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• неблагоприятные климатические условия;</li> <li>• недостаточное освещение;</li> <li>• повышенный уровень шума;</li> <li>• загазованность.</li> </ul> <p><b>1.2. Анализ опасных факторов при разработке и эксплуатации электропривода УЭЦН</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• механические травмы;</li> <li>• термические ожоги;</li> <li>• поражение электрическим током</li> </ul>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Анализ воздействия на атмосферу (выбросы), гидросферу (сбросы) и литосферу (отходы) в процессе эксплуатации нефтяной скважины.</p>

<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	Наиболее типичные ЧС для рассматриваемой рабочей зоны – пожар, разлив нефти. Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС, действий во время ЧС и для ликвидации её последствий.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	Анализ правовых вопросов для работников нефтяной промышленности (трудовое законодательство), перечень обязательной нормативно-технической документации.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОКД ИШНКБ	Ледовская Анна Михайловна	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗБ2	Тикин Дмитрий Николаевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 110 страниц, 38 рисунков, 25 таблицы, 18 источников.

Ключевые слова: электроцентробежный насос, асинхронный двигатель, механические и электромеханические характеристики, переходные процессы, коэффициент полезного действия, станция управления, ресурсосбережение, социальная ответственность.

Объектом исследования является электрооборудование системы управления электроцентробежным погружным насосом. Цель работы: провести расчет и исследование электропривода погружной установки электроцентробежного насоса нефтяной скважины и правильно подобрать необходимое электрооборудование. Привести экономическое обоснование исследовательского проекта.

В процессе расчета проекта привести расчеты насосной установки на основе заданных данных, расчет дополнительного оборудования, выбор основных элементов установки и проверка при различных режимах работы. С помощью имитационной модели в MATLAB провести исследование переходных характеристик выбранного АД.

## Содержание

Введение .....	10
1. Технологический процесс.....	11
2. Выбор двигателя.....	16
3. Описание и выбор системы управления .....	25
3.1. Общие сведения о системах управления УЭЦН .....	25
3.2. Выбор управления УЭЦН.....	27
3.3. Описание электропривода со станцией управления «Электон-5-ПЧ-ТТПТ-250-380-50-1 УХЛ1».....	29
4. Выбор защитных устройств.....	37
5. Выбор кабельных линий .....	39
5.1. Кабельные линии для погружных двигателей ЭЦН .....	39
5.2. Выбор высоковольтной кабельной линии .....	39
5.3. Выбор низковольтных КЛ .....	40
6. Расчет характеристик двигателя.....	42
6.1. Расчет параметров элементов схемы замещения .....	42
6.2. Расчет и построение естественных характеристик АД .....	47
6.2.1. Расчет и построение естественной механической характеристики электродвигателя .....	48
6.2.2. Расчет и построение естественных электромеханических характеристик ротора и статора электродвигателя .....	49
7. Расчет характеристик для системы ПЧ-АД .....	53
7.1. Расчёт искусственных (регулируемых) характеристик электропривода в системе «ПЧ-АД» $\omega = f(I)$ , $\omega = f(M)$ для определенного диапазона регулирования скорости .....	53
7.2. Расчёт регулировочных характеристик электропривода в системе «ПЧ-АД» $\omega = f(I)$ , $\omega = f(M)$ для определенного диапазона регулирования скорости с учетом IR-компенсации .....	59
7.3. Расчет потерь в электроприводе с насосной нагрузкой при работе в заданном диапазоне скоростей .....	62



8. Моделирование переходных процессов электропривода УЭЦН .....	64
8.1. Расчет переходных процессов скорости и момента для режима прямого пуска с насосом на валу двигателя .....	64
8.2. Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска с нагрузкой в виде насоса на валу двигателя системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» .....	68
9. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	78
9.1. SWOT-анализ .....	78
9.2. Разработка графика проведения работ технического проекта .....	81
9.3. Бюджет разработки электропривода .....	86
10. Социальная ответственность .....	94
10.1. Производственная безопасность .....	94
10.2. Экологическая безопасность .....	100
10.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	102
10.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	104
11. Заключение .....	107
12. Список литературы .....	109

## Введение

Для Российской Федерации характерны неблагоприятные залегания запасов нефти и газ, обусловленные расположением в неблагоприятных климатических и труднодоступных районах. Освоенными являются немного больше трети этих запасов. Из которых две трети – это трудно извлекаемая нефть, расположенная в низкопроницаемых и глубокопогруженных пластах, подгазовых зонах, а также это остаточные запасы и вязкие нефти, которые требуют дополнительных технологических решений. Таких, например, как повышение интенсификации добычи нефти за счет пластовых гидроразрывов и закачки воды для увеличения пластового давления.

С освоением вновь открытых месторождений увеличивается число вводимых скважин, растет и глубина этих скважин. Появляются новые способы прокладки скважин, например уход от бурения наклонных скважин к горизонтальным, что позволяет повысить в несколько раз отбор нефти из скважины и снизить фонд скважин на месторождении, особый эффект достигается при отборе из малонасыщенных пластов. Рост общего фонда скважин требует повышенного внимания к надежности работы добывающего оборудования.

Значительное усложнение условий эксплуатации нефтяных месторождений, истощение основных крупных месторождений жидкого и газообразного углеводородного сырья, практически полная амортизация большего количества пробуренных несколько лет назад добывающих скважин привело к возрастанию роли нефтегазового оборудования в добыче и подготовке нефти и газа.

Для увеличения дебета скважин и снижения потребления электроэнергии (особенно когда такие способы добычи как фонтанный и газлифтный (компрессорный и бескомпрессорный) исчерпают себя, которым требуется достаточное пластовое давление и газовый фактор) все большее применение находят бесштанговые насосы – установки электроприводных центробежных насосов (УЭЦН), которыми в настоящее время оснащено более трети нефтяных скважин и добывается более двух третей всей нефти.

## 1. Технологический процесс

Самое большое распространение среди лопастных динамических насосов в нефтедобывающей промышленности получили центробежные, которые могут создать большой напор при необходимых подачах жидкости и габаритах насоса и обладают удовлетворительными КПД и надежностью.

В действие скважинный центробежный насос приводит погружной электродвигатель. Электроэнергия подается к электродвигателю по специальному кабелю, проходящему в скважине вдоль насосно-компрессорных труб (НКТ). Расположение двигателя в скважине непосредственно с насосом решила много проблем с передачей энергии насосу и позволила использовать достаточно мощные насосы. Преимущества скважинных электроприводных центробежных насосов (ЭЦН) объясняет их широкое применение. Установки ЭЦН более экономичны при больших объемах откачиваемой жидкости, чем насосы других типов и требуют меньше усилий по обслуживанию. Расход электроэнергии при этом относительно не большой и обеспечивается достаточной высокой КПД. Так как в скважине находится только насос с двигателем, а остальное оборудование – станция управления и трансформатор, которые не требуют особого ухода, на поверхности, то обслуживание электропривода очень простое.

Применение установок ЭЦН позволяет эффективно бороться с отложениями парафина в подъемной колонне НКТ. Используются трубы со особым покрытием. Применяются автоматизированные устройства подачи реагента в скважину и скребки, спускаемые в трубы на проволоке. Наземное оборудование небольшое по габаритам и не требует установки специальных опор или фундаментов, может размещаться на небольших площадках под открытым небом или в небольших контейнерах.

Схема установки ЭЦН приведена на рис. 1.1.

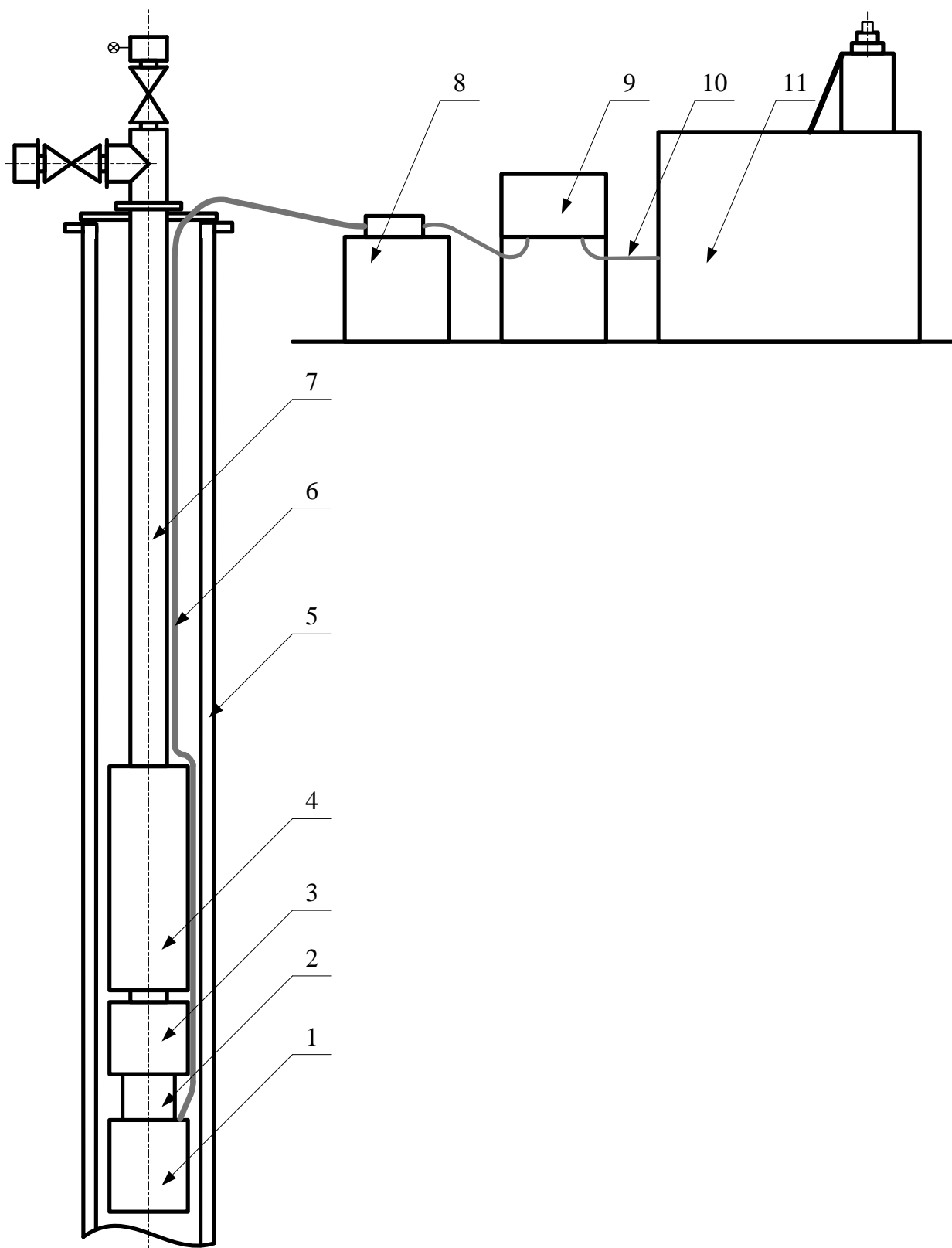


Рис. 1.1. Погружной электроцентробежный насос

1 – электродвигатель; 2 – гидрозащита; 3 – газосепаратор; 4 – насос;  
 5 – обсадная труба скважины; 6 – высоковольтная кабельная линия;  
 7 – насосно-компрессорная труба; 8 – трансформатор повышающий;  
 9 – станция управления; 10 – силовая кабельная линия (0,4 кВ);  
 11 – комплектная трансформаторная подстанция.

В насос нефть с водой поступает через сетку в нижней части. Сетка необходима для фильтрации пластовой жидкости. Далее жидкость подается из установки в НКТ. Так как погружной асинхронный электродвигатель (маслозаполненный, герметизированный) должен быть защищен от попадания жидкости, соединение с насосом осуществляется через узел гидрозащиты. Для получения больших напоров при малых габаритах ЭЦН асинхронные двигатели разгоняют насосы до 2800-2950 мин<sup>-1</sup>. [1]

В случае повышенного содержания газа к установкам в комплекте идет газосепаратор или диспергатор.

Запитываются электродвигатели по высоковольтному кабелю от повышающего трансформатора на поверхности.

Кабель прокладывается в скважине вдоль НКТ круглый (плоский), а возле насосного агрегата только плоский для получения оптимального зазора (минимум – 6 мм) между стенками скважины и корпусом установки.

Габариты погружной установки определяется этим зазором. [1]

Чтобы уменьшить размеры двигателя и кабеля запитывают их через повышающий напряжение промышленной сети трансформатор. Использование трансформатора также позволяет скомпенсировать падение напряжения на кабельной линии.

Для включения и останова установки ЭЦН используется станция управления, которая также позволяет управлять насосом в автоматическом режиме. Кроме того, станция содержит приборы, отображающие параметры двигателя, а в некоторых модификациях и другие параметры (например - сопротивление изоляции кабельной линии). Современные станции управления могут задавать и поддерживать необходимые режимы работы системы «пласт—скважина – насосная установка» и проводить диагностику узлов УЭЦН.

Колонна НКТ снабжается обратным клапаном и спускным. Обратный находится в специальной муфте с конической внутренней резьбой НКТ на

концах. Обратный клапан необходим для удержания жидкости в стволе НКТ при останове. Пуск насоса будет намного легче при большом напоре, т.е. заполненной НКТ и еще можно закрыть задвижку на устье.

Спускной клапан предназначен для слива жидкости с колонны труб при подъеме установке. Клапан выполнен таким образом, что при сбросе в колонну НКТ лома, последний разрушает клапан и соединяет полость труб с затрубом.

Обсадные колонны скважин имеют разные размеры и соответственно насосные установки выпускают разных габаритов. При этом при уменьшении диаметра установок их рабочие характеристики (напор, подача, КПД) снижаются.

Каждая установка имеет свой шифр, на пример УЭЦН5А-500- 800, в котором приняты следующие обозначения: цифра (или цифра и буква) после УЭЦН обозначает наименьший допустимый внутренний диаметр обсадной колонны, в которую он может быть спущен. Цифра «4» соответствует диаметру 112 мм, цифра «5» соответствует 122 мм, «5А» - 130мм, «6»-144мм и «6А» - 148 мм; второе число шифра обозначает номинальную подачу насоса (в м<sup>3</sup>/сут) и третье - примерный напор в м. Значения подачи и напора насоса даны для работы на воде. [1]

Для всех узлов УЭЦН (насосов, газосепараторов, двигателей и т.д.) введены технические условия, разработанные фирмами изготовителями или ГОСТы.

Так как УЭЦН имеет малый диаметр, то насос и двигатель может состоять из нескольких секций и вся сборка может быть более 40 метров в длину. Для получения нужных характеристик необходима максимальная частота вращения двигателя - 3000 мин<sup>-1</sup> для напряжения 50 Гц. Для улучшения параметров насоса используют специальные решения: вентильные двигатели или частотное регулирование.

Условия работы установки ЭЦН в агрессивной среде, да еще и при высокой температуре очень тяжелые. Но из-за сложности обслуживания и ремонта требуется, чтобы она работала как можно дольше. Поэтому особенно в последнее время были найдены новые технологические решения изготовления насосов, сплавы для рабочих колес и валов и др. для обеспечения надежной и безотказной работы УЭЦН даже при выше рассмотренных габаритах.

## 2. Выбор двигателя

При подборе установок ЭЦН к нефтяным скважинам, осуществляемом с помощью «ручного» счета (калькулятор, программы в оболочке EXCEL, ACCESS), необходимо для сокращения времени ввода данных и времени расчета использовать некоторые дополнительные допущения и упрощения в методике подбора . [2]

Основными среди этих допущений являются:

1. Равномерное распределение мелких пузырьков газа в жидкой фазе при давлениях, меньших давления насыщения.
2. Равномерное распределение нефтяной и водяной составляющих в столбе откачиваемой жидкости на участке «забой скважины — прием насоса, при любых величинах дебитов скважины.
3. Пренебрежение «скольжением» нефти в воде при движении жидкости по обсадной колонне и колонне НКТ.
4. Тождество величин давлений насыщения в статических и динамических режимах.
5. Процесс движения жидкости от забоя скважины до приема насоса, сопровождающийся снижением давления и выделением свободного газа, является изотермическим».
6. Температура погружного электродвигателя считается не превышающей нормальную рабочую температуру, если скорость движения охлаждающей жидкости вдоль стенок ПЭД не менее рекомендуемой в технических условиях на ГГЭД или в Руководстве по эксплуатации установок ЭЦН.
7. Потеря напора (давления) при движении жидкости от забоя скважины до приема насоса и от зоны нагнетания насоса до устья скважины пренебрежимо малы по сравнению с напором насоса.



Для проведения подбора УЭЦН необходимы следующие исходные данные:

1. Плотность:

— воды:

$$\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3.$$

— сепарированной нефти:

$$\rho_{\text{н}} = 843 \text{ кг/м}^3.$$

— газа в нормальных условиях:

$$\rho_{\text{г}} = 0,1 \text{ кг/м}^3.$$

2. Эффективная вязкость смеси

$$\nu = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Планируемый дебит скважины:

$$Q = 75 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

4. Обводненность продукции пласта, доли единицы:

$$b = 0,7.$$

5. Газовый фактор:

$$G = 31 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

6. Текущее объемное газосодержание:

$$\Gamma = 0,5.$$

7. Объемный коэффициент нефти:

$$B = 1,1.$$

8. Глубина расположения пласта (отверстий перфорации):

$$L_{\text{скв}} = 2500 \text{ м}.$$

9. Пластовое давление и давление насыщения:

$$P_{\text{пл}} = 24 \text{ МПа}, \quad P_{\text{нас}} = 5 \text{ МПа}.$$

10. Пластовая температура и температурный градиент:

$$T_{\text{пл}} = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad G_{\text{Т}} = 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C/м}$$

11. Коэффициент продуктивности:

$$K_{\text{прод}} = 3,8 \text{ м}^3 \cdot \text{сут/МПа}.$$

12. Буферное давление:

$$P_{\text{буф}} = 2,5 \text{ МПа.}$$

12. Геометрические размеры обсадной колонны (наружный диаметр и толщина стенки), колонны НКТ (наружный диаметр и толщина стенки), насоса и погружного двигателя (наружный диаметр):

$$d_{\text{нар}} = 146 \text{ мм}, \quad s = 8 \text{ мм}, \quad d_{\text{нас}} = 117 \text{ мм.}$$

Подбор установки ЭЦН ведется в следующей последовательности:

1. Определим плотность смеси на участке «забой скважины — прием насоса» с учетом упрощений:

$$\rho_{\text{см}} = [\rho_{\text{в}} \cdot b + \rho_{\text{н}}(1 - b)](1 - \Gamma) + \rho_{\text{г}} \cdot \Gamma, \quad (2.1)$$

$$\rho_{\text{см}} = [1000 \cdot 0,7 + 843 \cdot (1 - 0,7)] \cdot (1 - 0,5) + 0,1 \cdot 0,5 = 476,5 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho_{\text{в}}$  — плотность сепарированной нефти, кг/куб. м;

$\rho_{\text{в}}$  — плотность пластовой воды;

$\rho_{\text{г}}$  — плотность газа в стандартных условиях;

$\Gamma$  — текущее объемное газосодержание;

$b$  — обводненность пластовой жидкости.

2. Определяется забойное давление, при котором обеспечивается заданный дебит скважины:

$$P_{\text{заб}} = P_{\text{пл}} - \frac{Q}{K_{\text{прод}}} = 24 - \frac{75}{3,8} = 4,26 \text{ МПа}, \quad (2.2)$$

где  $P_{\text{пл}}$  — пластовое давление;

$Q$  — заданный дебит скважины;

$K_{\text{прод}}$  — коэффициент продуктивности скважины.

3. Определим глубину расположения динамического уровня при заданном дебите жидкости:

$$H_{\text{дин}} = L_{\text{скв}} - \frac{P_{\text{заб}}}{\rho_{\text{см}} \cdot g} = 2500 - \frac{1,26}{476,5 \cdot 9,8} = 1587 \text{ м.} \quad (2.3)$$

4. Определим давление на приеме насоса, при котором газосодержание на входе в насос не превысит предельно-допустимое для данного региона и данного типа насоса (например —  $\Gamma = 0,25$ ):

$$P_{\text{пр}} = (1 - \Gamma) \cdot P_{\text{нас}} = (1 - 0,25) \cdot 5 = 3,75 \text{ МПа}, \quad (2.4)$$

где:  $P_{\text{нас}}$  — давление насыщения.

5. Определим глубину подвески насоса:

$$L = H_{\text{дин}} + \frac{P_{\text{пр}}}{\rho_{\text{см}} \cdot g} = 2229 + \frac{3,75 \cdot 10^6}{476,5 \cdot 9,8} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ м.} \quad (2.5)$$

Определим температуру пластовой жидкости на приеме насоса:

$$T = T_{\text{пл}} - (L_{\text{скв}} - L) \cdot G_T = 120 - (2500 - 2310) \cdot 0,02 = 116^\circ\text{C}, \quad (2.6)$$

где  $T_{\text{пл}}$  — пластовая температура;

$G_T$  — температурный градиент.

6. Определим объемный коэффициент жидкости при давлении на входе в насос:

$$B^* = b + (1 - b) \cdot \left[ 1 + (B - 1) \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{нас}}}} \right], \quad (2.7)$$

$$B^* = 0,7 + (1 - 0,7) \cdot \left[ 1 + (1,1 - 1) \cdot \sqrt{\frac{3,75}{5}} \right] = 1,026,$$

где  $B$  — объемный коэффициент нефти при давлении насыщения;

$b$  — объемная обводненность продукции;

$P_{\text{пр}}$  — давление на входе в насос;

$P_{\text{нас}}$  — давление насыщения.

7. Вычислим дебит жидкости на входе в насос:

$$Q_{\text{пр}} = Q \cdot B^* = 75 \cdot 1,026 = 76,95 \text{ м}^3/\text{сут} = 0,00089 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.8)$$

8. Определим объемное количество свободного газа на входе в насос:

$$G_{\text{пр}} = G \cdot (1 - P_{\text{пр}}/P_{\text{нас}}) = 31 \cdot \left( 1 - \frac{3,75}{5} \right) = 7,75 \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (2.9)$$

где  $G$  — газовый фактор.

9. Определим газосодержание на входе в насос:

$$b_{\text{вх}} = \frac{1}{\left( \frac{\left( 1 + \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{нас}}} \right)}{B^*} \right) \frac{G_{\text{пр}}}{G_{\text{пр}}} + 1}, \quad (2.10)$$

$$b_{\text{вх}} = 1 / \left[ \frac{\left( \frac{1 + \frac{3,75}{5}}{1,026} \right)}{7,75} + 1 \right] = 0,82.$$

10. Вычислим расход газа на входе в насос:

$$Q_{\text{г.пр.с}} = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot b_{\text{вх}}}{(1 - b_{\text{вх}})} = 76,95 \cdot \frac{0,82}{(1 - 0,82)} = 350 \text{ м}^3/\text{сут.} \quad (2.11)$$

11. Вычислим приведенную скорость газа в сечении обсадной колонны на входе в насос:

$$C = \frac{Q_{\text{г.пр.с}}}{f_{\text{скв}}} = \frac{350}{0,013} = 26,35 \cdot 10^3 \text{ м/сут} = 0,31 \text{ м/с}, \quad (2.12)$$

где  $f_{\text{скв}}$  — площадь сечения скважины на приеме насоса:

$$f_{\text{скв}} = \pi \cdot \frac{(d_{\text{нар}} - 2s)^2}{4}, \quad (2.13)$$

$$f_{\text{скв}} = 3,14 \cdot \frac{(146 - 2 \cdot 8)^2}{4} = 13266,5 \text{ мм}^2 = 0,013 \text{ м}^2.$$

12. Определим истинное газосодержание на входе в насос:

$$\varphi = \frac{b_{\text{вх}}}{\left(1 + \frac{b_{\text{вх}} \cdot C_{\text{п}}}{C}\right)} = \frac{0,82}{\left(1 + \frac{0,82 \cdot 0,0016}{0,31}\right)} = 0,816, \quad (2.14)$$

где  $C_{\text{п}}$  — скорость всплытия газовых пузырьков, зависящая от обводненности продукции скважины ( $C_{\text{п}} = 0,02 \text{ см/с}$  при  $b < 0,5$  или  $C_{\text{п}} = 0,16 \text{ см/с}$  при  $b > 0,5$ ).

13. Определим работа газа на участке «забой — прием насоса»:

$$P_{\text{г1}} = P_{\text{нас}} \left[ \left( \frac{1}{1 - 0,4\varphi} \right) - 1 \right] = 5 \cdot \left[ \left( \frac{1}{1 - 0,4 \cdot 0,816} \right) - 1 \right] = 3 \text{ МПа.} \quad (2.15)$$

14. Определим работу газа на участке «нагнетание насоса — устье скважины»:

$$P_{г2} = P_{нас} \left[ \left( \frac{1}{(1 - 0,4\varphi_{буф})} \right) - 1 \right], \quad (2.16)$$

$$P_{г2} = 5 \cdot \left[ \left( \frac{1}{(1 - 0,4 \cdot 0,845)} \right) - 1 \right] = 2,9 \text{ МПа},$$

Где

$$b_{буф} = 1 / \left[ \left( (1 + P_{буф}/P_{нас}) / B_{буф}^* \right) / G_{буф} + 1 \right], \quad (2.17)$$

$$b_{буф} = 1 / \left[ \left( \left( 1 + \frac{2,5}{5} \right) / 1,025 \right) / 9,3 + 1 \right] = 0,913;$$

$$\varphi_{буф} = \frac{b_{буф}}{\left[ 1 + \frac{b_{буф} C_{п}}{C} \right]} = \frac{0,849}{\left[ 1 + \frac{0,849 \cdot 0,0016}{0,31} \right]} = 0,909, \quad (2.18)$$

$$G_{буф} = G \left( 1 - \frac{P_{буф}}{P_{нас}} \right) = 31 \cdot \left( 1 - \frac{3,5}{5} \right) = 15,5 \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (2.19)$$

$$B_{буф}^* = b + (1 - b) \cdot \left( 1 + (B - 1) \sqrt{P_{буф}/P_{нас}} \right) = 1,021. \quad (2.20)$$

Величины с индексом «буф» относятся к сечению устья скважины и являются «буферными» давлением, газосодержанием и т.д.

15. Определим потребное давление насоса:

$$P = \rho \cdot g \cdot H_{дин} + P_{буф} - P_{г1} - P_{г2}, \quad (2.21)$$

$$P = 476,5 \cdot 9,8 \cdot 2229 + 3,5 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6 - 2,9 \cdot 10^6 = 4,6 \text{ МПа},$$

где  $H_{дин}$  — глубина расположения динамического уровня;

$P_{буф}$  — буферное давление;

$P_{г1}$  — давление газа на приеме насоса;

$P_{г2}$  — давление газа на «выкиде» скважины.

16. По объему подачи насоса, нужному давлению или напору насоса и согласно габаритам обсадной колонны выберем погружной центробежный насос и произведем расчет оптимальных параметров: подача, напор, КПД, мощность, и в режиме подачи, равной «0» (напор, мощность). [2]

Выберем насос ВНН5-80-2300/03-043, высотой подъема 2300 м. [3]

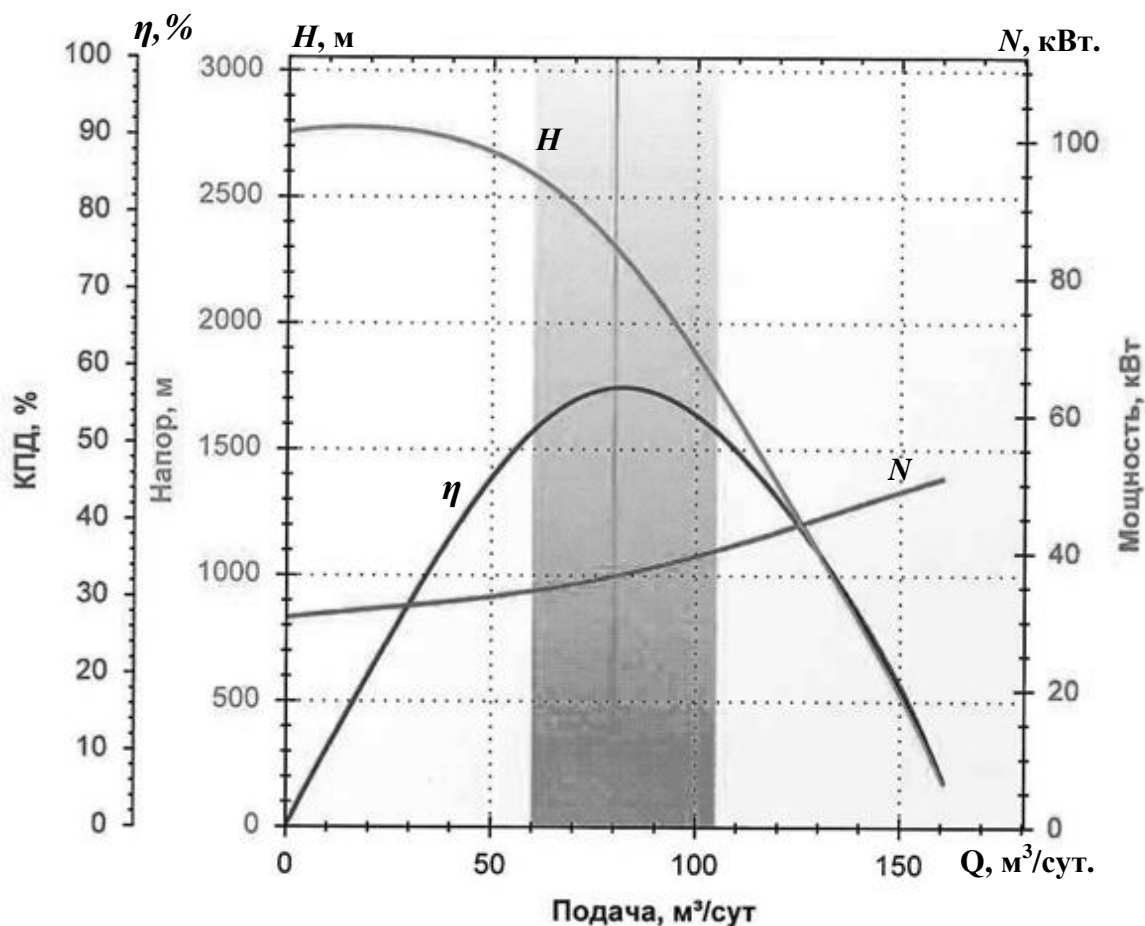


Рис. 2.1. Характеристики насоса Новомет ВNH5-80-2300 (402)

Частота: 2800 об./мин - 50,0 Гц.

Плотность рабочей жидкости: 1000,0 кг/м³.

Развиваемое давление: 22,59 МПа.

$Q_{ov} = 80 \text{ м}^3/\text{сут} = 0,00093 \text{ м}^3/\text{с}$ ,

$H_{ov} = 2300 \text{ м}$ ,

$\eta_{ov} = 0,56$ ,

$N_{ov} = 34 \text{ кВт}$ .

17. Определим коэффициент изменения подачи насоса при работе на нефтегазовой смеси относительно водяной характеристики:

$$K_{Qv} = 1 - 4,95 \nu^{0,85} Q_{ov}^{-0,57}, \quad (2.22)$$

$$K_{Qv} = 1 - 4,95 \cdot (3,8 \cdot 10^{-5})^{0,85} 0,00093^{-0,57} = 0,954,$$

где  $\nu$  — эффективная вязкость смеси;

$Q_{ov}$  — оптимальная подача насоса на воле.

18. Вычислим коэффициент изменения КПД насоса из-за влияния вязкости:

$$K_{\eta v} = 1 - \frac{1,95 \nu^{0,4}}{Q_{oB}^{0,27}}, \quad (2.23)$$

$$K_{\eta v} = 1 - \frac{1,95 \cdot (3,8 \cdot 10^{-5})^{0,4}}{0,00093^{0,27}} = 0,781.$$

19. Вычислим коэффициент сепарации газа на входе в насос:

$$K_c = 1/(1 + (6,02 Q_{пр}/f_{скв.к})), \quad (2.24)$$

$$K_c = 1/(1 + (6,02 \cdot 0,00089/0,0025)) = 0,32,$$

где

$$f_{скв.к} = f_{скв} - \pi \frac{d_n^2}{4} = 0,013 - 3,14 \cdot \frac{0,117^2}{4} = 0,0025 \text{ м}^2 \quad (2.25)$$

— площадь кольца, образованного внутренней стенкой обсадной колонны и корпусом насоса.

20. Определим относительную подачу жидкости на входе в насос:

$$q = \frac{Q_{ж.пр}}{Q_{oB}} = \frac{0,00086}{0,00093} = 0,937. \quad (2.26)$$

21. Определим относительную подачу на входе в насос в соответствующей точке водяной характеристики насоса:

$$q_{пр} = Q_{ж.пр}/Q_{oB} K_{qn} = \frac{0,00086}{0,00093 \cdot 0,954} = 0,983 \quad (2.27)$$

22. Вычислим газосодержание на приеме насоса с учетом газосепарации:

$$b_{пр} = b_{вх} \cdot (1 - K_c) = 0,82 \cdot (1 - 0,32) = 0,558. \quad (2.28)$$

23. Определим коэффициент изменения напора насоса из-за влияния вязкости:

$$K_{Hv} = 1 - \left( \frac{1,07 \nu^{0,6} q_{пр}}{Q_{oB}^{0,57}} \right), \quad (2.29)$$

$$K_{Hv} = 1 - \left( \frac{1,07 \cdot (3,8 \cdot 10^{-5})^{0,6} \cdot 0,983}{0,00093^{0,57}} \right) = 0,874.$$

24. Определим КПД насоса с учетом влияния вязкости, свободного газа и режима работы:

$$\eta = K_{\eta v} \cdot K_{\eta q} \cdot \eta_{0B} = 0,874 \cdot 0,32 \cdot 0,56 = 0,157, \quad (2.30)$$

где  $\eta_{0B}$  — максимальный КПД насоса на водяной характеристики.

25. Определим мощность насоса:

$$N = \frac{P \cdot Q}{\eta} = \frac{4,6 \cdot 10^6 \cdot 75}{0,157} = 25670 \text{ Вт.} \quad (2.31)$$

26. Определим мощность погружного двигателя:

$$N_{\text{ПЭД}} = \frac{N}{\eta_{\text{ПЭД}}} = \frac{25670}{0,8} = 32 \text{ кВт.} \quad (2.32)$$

Выберем двигатель ПЭДН-63-117-2000-26А производства «Новомет», с параметрами табл. 2.1. [4]

Таблица 2.1.

Параметры асинхронного двигателя ПЭДН-63-117-2000-26А.

Наименование		Значение
Тип двигателя		ПЭД-Н-63-117
Мощность при 50 Гц, кВт		63
Мощность при 60 Гц, кВт		76
Номинальное напряжение при 50 Гц, В		2000
Номинальное напряжение при 60 Гц, В		2400
Номинальный ток, А		26
cos φ		0,84
КПД, %		84
Скорость охлаждения жидкости не менее м/с		0,12
Сопротивление изоляции, МОм	при 20°C	1000
	при 115 °C	25
Скольжение, %		5
Масса, кг		503
Длина, мм		6658



### **3. Описание и выбор системы управления**

#### **3.1. Общие сведения о системах управления УЭЦН**

Так как электродвигатель электроцентробежного насоса (ЭЦН) имеет ограниченные габариты, расположен на большой глубине и соответственно на большом удалении от источника питания, а также условия его эксплуатации не позволяют запускать на прямую, то требуется система управления запуском электродвигателя и контроля рабочих параметров как двигателя так и ЭЦН. Для этого используются станции управления (СУ) установками ЭЦН, которые обеспечивают:

- плавный разгон двигателя УЭЦН до нужной скорости;
- контроль рабочих параметров электродвигателя;
- контроль параметров пластовой жидкости (давление, температура...) в затрубе скважины с помощью телеметрической системы на УЭЦН;
- изменение скорости двигателя УЭЦН без останова;
- векторное управление двигателем по выбранному параметру;
- экстренный останов УЭЦН по защите по перегрузу, недогрузу (отсутствие подачи жидкости), перегреву двигателя, короткого замыкания на линии и т.д.

Регулируемые электроприводы для УЭЦН построены, как правило, по схеме преобразователь частоты (ПЧ) – асинхронный двигатель (АД), или вентильного электродвигателя, когда частота и фаза выходного напряжения ПЧ жестко связаны с положением ротора электромеханического преобразователя, выполняемого, как правило, по типу синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов.

Управлять скоростью короткозамкнутого асинхронного двигателя в системе «ПЧ – АД» можно изменением питающего напряжения, частоты тока напряжения или одновременно изменением частоты и напряжения статора. Для различных типов нагрузки существуют свои законы

регулирования. Для насосной нагрузки –  $\frac{U_1}{f_1^3} = const$ , при котором обеспечиваются на валу необходимый момент и низкие потери мощности.

Вентильный электропривод по энергетическим характеристикам лучше и экономичнее асинхронных. Потребляемый ток при одинаковом питающем напряжении значительно меньше, следовательно, КПД больше. Такие преимущества позволяют уменьшить потери в кабельной линии и продлить ресурс двигателя. Конструктивно вентильный двигатель является синхронным. Вентильный коммутатор питает трехфазную обмотку на статоре. Ротор выполнен с постоянными магнитами или обмоткой возбуждения, питаемой через контактные кольца. Регулирование скорости происходит за счет изменения напряжения, тока возбуждения и угла управления вентилями инвертора.

Так как УЭЦН расположен на большом расстоянии от источника питания, то неизбежны большие энергетические и материальные потери на силовой линии. Для снижения электрических потерь и уменьшения габаритов двигателя и размеров кабельной линии электродвигатели УЭЦН изготавливают высоковольтными (до 2000 В и выше). Что позволяет снизить ток в линии и следовательно ее сечение. Для этого между СУ и УЭЦН размещают повышающий трансформатор. Переключением ступеней, которого можно подобрать нужное напряжение и скомпенсировать потери на кабельной линии.

Наличие разделительного трансформатора усложняет управление ВД, поэтому большее распространение получило частотное регулирование скорости АД с короткозамкнутым ротором. Связь частоты тока питающего напряжения и скорости АД  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$  позволяет даже при скалярном управлении получать нужную скорость двигателя, а следовательно устойчивые характеристики УЭЦН.

В настоящее время используются преобразователи частоты на силовых ключевых элементах – тиристорах. Также все большее распространение

получают схемы с использованием полностью управляемых силовых транзисторов с изолированным затвором типа IGBT и MOSFET.

Как правило, ПЧ состоит из выпрямителя на тиристорах, силового фильтра и автономного инвертора на IGBT-транзисторах, преобразующего постоянное напряжение в переменное нужной частоты и величины.

Развитие микропроцессорной технологии позволяет создать контроллеры, небольшие по размерам, которые позволят управлять как преобразователем частоты, так и контролировать в режиме реального времени текущие параметры двигателя, УЭЦН, окружающей его среды и т.д. И на основании этих параметров или менять режим работы или останавливать УЭЦН в случае отклонения параметров от нормы.

### 3.2. Выбор управления УЭЦН

Для управления электродвигателем ПЭДН-63-117-2000-26А производства «Новомет» выберем станцию управления «Электрон 5». [5]

Рассчитаем ток на выходе СУ – входе повышающего трансформатора.

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{76000 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 3420} = 212 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.1)$$

Рассчитаем ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме.

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{Н,ДВ}}}{\sqrt{3} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi \cdot U_{\text{Л1}}} = \frac{76000}{\sqrt{3} \cdot 0,84 \cdot 0,84 \cdot 2400} = 25,7 \text{ А}. \quad (3.2)$$

Частота вращения при 50 Гц:

$$n_{50} = n_0 \cdot (1 - s_H) = 3000 \cdot (1 - 0,05) = 2850 \text{ об/мин}. \quad (3.3)$$

Частота вращения при 60 Гц:

$$n_{60} = \frac{60f_1}{p} \cdot (1 - s_H) = \frac{60 \cdot 60}{1} \cdot (1 - 0,05) = 3420 \text{ об/мин}. \quad (3.4)$$

Рассчитаем ток на входе повышающего трансформатора при условии полной загрузки электродвигателя УЭЦН,  $f_1 = 60$  Гц:

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{НОМ}} \cdot \frac{U_{\text{Л1}}}{U_{\text{НН1}}} = 25,7 \cdot \frac{2400}{380} = 162 \text{ А}. \quad (3.5)$$

Согласно полученному номинальному выходному току для СУ выберем «Электрон-5-ПЧ-ТТПТ-250-380-50-1 УХЛ1» с максимальным током 250 А.

Проверим на адекватность выбора ПЧ из следующих условий:

- Рассчитывается полная пусковая мощность ПЧ:

$$\left( \frac{k \cdot n_{\text{дв}}}{9550 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot \left( M_{\text{ст}} + \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t_A} \right) \right) \leq 1,5 \cdot P_{\text{н.пч}}; \quad (3.6)$$

$$\left( \frac{0,95 \cdot 3420}{9550 \cdot 0,84 \cdot 0,84} \cdot \left( 211 + \frac{1,2}{9,55} \cdot \frac{3420}{3} \right) \right) \leq 1,5 \cdot \sqrt{3} \cdot 250 \cdot 0,84 \cdot 0,84 \cdot 380;$$

$$170 \text{ кВт} \leq 170 \text{ кВт}.$$

Где  $k$  – коэффициент искажения тока, связанный с алгоритмом формирования синусоиды тока с помощью ШИМ (широотно-импульсной модуляции напряжения на двигателе). Этот коэффициент может принимать значения от 0,95 до 1,05 и не имеет размерности.

$t_A$  – время разгона.

$M_{\text{ст}}$  – статический момент нагрузки на валу двигателя, Н·м, чаще всего это номинальный момент двигателя, взятый из спецификации на двигатель.

- Рассчитывается ток  $I_{\text{ПОТР}}$ , который потребляет двигатель при работе от преобразователя частоты при напряжении  $U$  сети 220/380В:

$$I_{\text{ПОТР}} = \frac{k \cdot n_{\text{дв}} \cdot M_{\text{н.дв}}}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U_{\text{л1}} \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{U_{\text{л1}}}{U_{\text{нн1}}}, \quad (3.7)$$

$$I_{\text{ПОТР}} = \frac{0,95 \cdot 3420 \cdot 211}{9,55 \cdot 0,84 \cdot 0,84 \cdot 2400 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{2400}{380} = 162 < 250 \text{ А},$$

$U_{\text{л1}}$  – линейное напряжение (действующее значение) на обмотках двигателя, В.

- Рассчитывается ток  $I_{\text{ПОТР.р.}}$ , который потребляет двигатель при линейном разгоне:

$$I_{\text{ПОТР.р.}} = \frac{k \cdot n_{\text{дв}}}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} \cdot \left( M_{\text{ст}} + \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t_A} \right), \quad (3.8)$$

$$I_{\text{ПОТР.р.}} = \frac{0,95 \cdot 3420}{9,55 \cdot 0,84 \cdot 0,84 \cdot 2400 \cdot \sqrt{3}} \cdot \left( 211 + \frac{1,2}{9,55} \cdot \frac{3420}{3} \right) = 249 < 250 \text{ А.}$$

где  $M_{ст}$  – статический момент нагрузки на валу двигателя, Н·м, чаще всего это номинальный момент двигателя, взятый из спецификации на двигатель;

$M_{дин}$  – динамический момент нагрузки, возникающий при разгоне инерционной нагрузки, Н·м.

- Рассчитывается полная потребляемая двигателем мощность в номинальном установившемся режиме

$$S_{\text{ПОТР}} = \frac{k \cdot P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,95 \cdot 76}{0,84 \cdot 0,84} = 102 \text{ кВА.} \quad (3.9)$$

где  $P$  – номинальная мощность двигателя при  $f_1 = 60$  Гц, кВт.

Из получившихся условий можно сделать вывод, что ПЧ выбран правильно.

### 3.3. Описание электропривода со станцией управления

#### «Электон-5-ПЧ-ТППТ-250-380-50-1 УХЛ1»

Состоит электропривод из станции управления (СУ) «Электон-5-ПЧ-ТППТ-250-380-50-1 УХЛ1» (5), повышающего трансформатора ТМПГ-250/3 и двигателя ПЭДН-63-117-2000, соединённого с насосом ВНН5-80-2300 и представляющие собой единую установку, опускаемую в скважину.

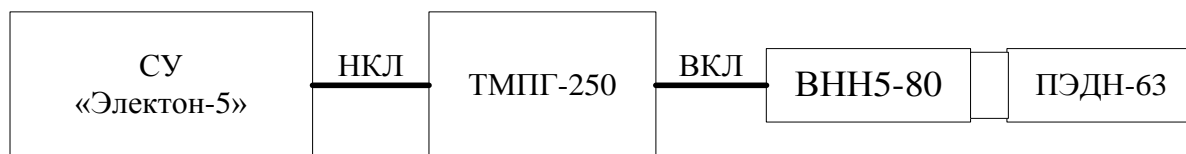


Рис. 3.1. Структурная схема ЭП.

Таблица 3.1.

Параметры станции управления  
«Электон-5-ПЧ-ТППТ-250-380-50-1 УХЛ1»

Наименование	Значение
Входное напряжение, В	380
Предельно допустимое отклонение напряжения от номинального значения	$\pm 15\%$ .
Выходное номинальное напряжение трехфазное, В	$(0 \dots 0,95) \cdot 380$
Частота сети, Гц	50
Выходная частота, Гц	$(3,5 \dots 75) \pm 0,1 \%$
Выходной номинальный ток, А	250
Коэффициент полезного действия при номинальном токе	0,95
Коэффициент мощности сети	0,95
Коэффициент нелинейных искажений выходных токов	не более 5 %.

Таблица 3.2.

Параметры трансформатора ТМПП-250/3.

Наименование	Значение
Входное напряжение, В	380
Выходное номинальное напряжение, В	2247
Номинальная мощность, кВт	250
Номинальные напряжения ответвлений обмоток ВН, В	2947-2897-2847-2797-2747-2697-2647-2597-2547-2497-2447-2397-2347-2297-2247-2197-2147-2097-2047-1997-1947-1897-1847-1797-1747
Схема и группа соединения	Ун/У-0
Потери ХХ/КЗ, кВт	0,65/3,7
Напряжение короткого замыкания, %	7
Ток холостого хода, %	1,4

Рассмотрим работу данного ЭП.

Так как жидкость нужно поднимать с большой глубины (более 2000 м), то насосная установка должна находиться в самой скважине ниже уровня жидкости, поэтому расстояние между СУ и двигателем большое. Чтобы избежать потери электроэнергии на линии передачи и экономических затрат, а также уменьшить габаритные размеры установки, применяют

высоковольтные двигатели, которые позволяют использовать кабельную линию небольшого сечения (КПпБП 120 3х16).

Повышение напряжения происходит с помощью повышающего трансформатора, который располагается рядом со СУ. Трансформатор имеет соединение обмоток «звезда с нулевым выходом – треугольник». Коэффициент трансформации выбирается таким образом, чтобы скомпенсировать потери на линии и получить на обмотках двигателя номинальное напряжение.

Станции управления серии «ЭЛЕКТОН-05» предназначены для управления трехфазными двигателями с короткозамкнутым или фазным ротором распространенных общепромышленных серий, для их защиты и регулирования частоты вращения.

### **ОСОБЕННОСТИ СТАНЦИЙ «ЭЛЕКТОН-05»**

- Входные цепи выполнены на более высокое напряжение для повышения устойчивости при кратковременных перенапряжениях.
- Стабилизация выходного напряжения при эксплуатации от нестабильной питающей сети.
- Встроенный фильтр предназначен для уменьшения коэффициента несинусоидальности напряжения на входе СУ.
- Собственный или встроенный счетчик для учета потребляемой активной и реактивной электроэнергии.
- USB-порт для съема информации на стандартный USB накопитель.
- LAN-порт для подключения в сеть Ethernet по протоколу Modbus TCP.
- Конструкция отличается повышенной ремонтопригодностью. [5]

Имеется возможность запуска насосной установки по задаваемой программе, в ручном и в автоматическом режиме, а также возможность поддержания технологического параметра (частоты, тока, давления) с помощью встроенного ПИД-регулятора.

На вход СУ «Электон-5» поступает переменное трехфазное

напряжение 380 В промышленной частоты (50 Гц). Силовая часть сконструирована по обычной схеме для типичных преобразователей частоты в виде двухступенчатого преобразователя энергии трехфазного тока сети в энергию трехфазного тока с регулируемым напряжением и частотой.

Тиристорный управляемый выпрямитель преобразует переменное напряжение 0,4 кВ в постоянное, LC-фильтр стабилизирует его от скачков сети. Затем автономный инвертор преобразует постоянное в переменное трехфазное с требуемыми частотой и напряжением.

Основой для АИН служат биполярные транзисторы с изолированным затвором, изготовленным по IGBT-технологии, таким образом, формируется выходное напряжение с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с необходимой несущей частотой, или с помощью шестимпульсной модуляции. Меняя напряжение на затворах IGBT-сборок, получаем на выходах U, V, W трехфазное напряжение с регулируемой частотой и амплитудой. Упрощенная электрическая схема преобразователя частоты СУ представлена на рис. 3.2.

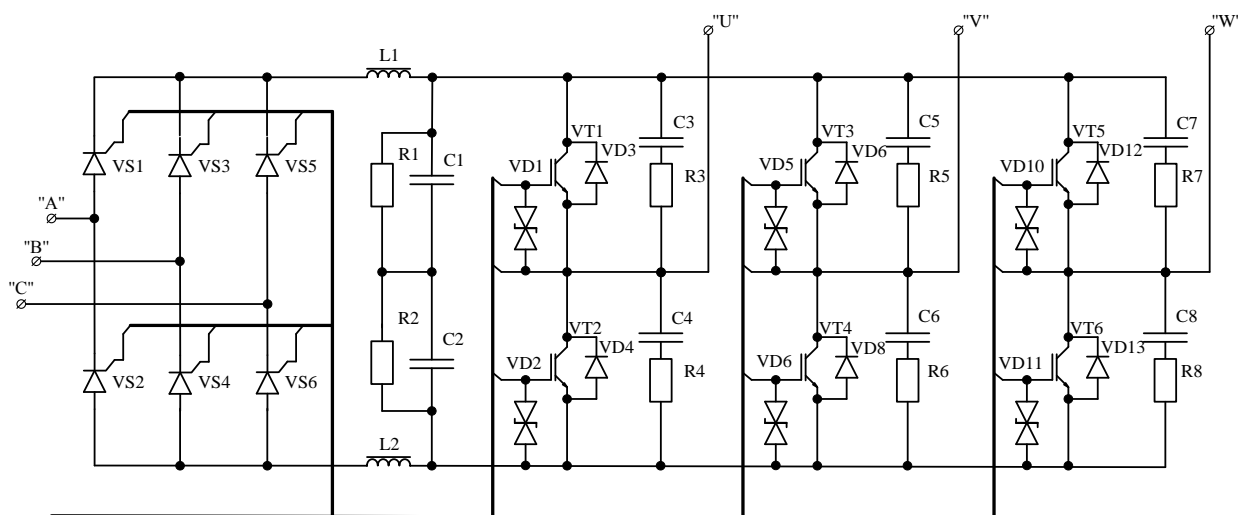


Рис. 3.2. Упрощенная электрическая схема преобразователя частоты СУ «Электрон 5».

Схема входного выпрямителя и автономного инвертора выполнена на тиристорных модулях и IGBT, соответствующих по току мощности станции.

Тиристорные и IGBT блоки размещаются на общих алюминиевых



охлаждателях, имеющих принудительное охлаждение. Охладители содержат температурные датчики, которые при перегреве выдают сигнал в систему управления, вмонтированы датчики температуры, сигнал от которых поступает в систему управления, где, при недопустимом перегреве радиатора, вырабатывается сигнал аварии с выдачей необходимой информации на индикаторе контроллера "Электон-09.1".

В станциях управления мощный LC-фильтр состоит из двух или больше конденсаторов, последовательно подключенных, для обеспечения запаса по напряжению.

Сигналы для управления IGBT с системы управления поступают на плату драйверов, для формирования двухполярных мощных сигналов, управляющих затворами IGBT. В плате драйверов также имеются схемы гальванических развязок и цепи, отслеживающие аварийные состояния транзисторов инвертора.



Рис. 3.3. Внешний вид передней панели контроллера «Электон-09.1».

Силовая часть станции управления содержит элементы, необходимые для работы систем управления (приборы контроля токов, напряжений, аппаратура для коммутаций и др.), а также защитные системы.

Два контроллера «Электон-09.1» и «Электон-09.2», источники, их питающие, драйвера управления IGBT-блоками, драйвера управления тиристорного выпрямителя, блок управлением обдувом/обогревом, система контроля сопротивления изоляции составляют все вместе систему

правления электроприводом.

На выходе СУ получаем напряжение с заданными станцией параметрами – напряжение и частота тока, необходимые для питания двигателя. Как правило на трансформатор со СУ подается номинальное напряжение 380 В, а регулировка скорость вращения двигателя (мощности насоса) происходит за счет изменения частоты тока. Поскольку СУ «Электон-5» могут дополнительно комплектоваться блоками для измерения дополнительными параметров насосной установки (например: телеметрическая система «Электон-ТМС-3» для измерения давления и температуры жидкости в скважине и др.), данные СУ могут обеспечивать работу асинхронного электродвигателя в следующих режимах:

- работа по заданной программе;
- поддержка тока двигателя;
- поддержка выходной частоты;
- поддержка выбранного параметра (давление, температура, любой другой по сигналу на аналоговых входах) путем автоматического регулирования выходной частоты в зависимости от изменения величины этого параметра.

Задачи системы погружной телеметрии «Электон - ТМС-3» – регистрация и передача другим устройствам текущих параметров:

- давление пластовой жидкости на приеме насосной установки;
- температура масла погружного электродвигателя (ПЭД);
- уровень виброускорения ПЭД в радиальном и осевом направлениях;
- температура пластовой жидкости;
- переменное напряжение в точке «'0' ТМПН»;
- сопротивление изоляции или ток утечки (по выбору) системы «ТМПН – погружной кабель – ПЭД».

СУ «Электон-5» выполняет также защитную функцию, как двигателя так и электропривода в целом. Так как контроллеры измеряют параметры напряжений токов и др., то они же контролируют их. В случае отклонения их от заданных происходит останов двигателя.



Рис. 3.4. Внешний вид СУ «Электон-5».

Например:

"НЕДОГРУЗ" - отключение двигателя при недогрузке (защита от срыва подачи).

"ПЕРЕГРУЗ" - отключение двигателя при перегрузке по программируемой ампер-секундной характеристике.

"Сопр.изол." - отключение двигателя при снижении сопротивления изоляции системы "ТМПН - погружной кабель – ПЭД" ниже заданного функцией 070 значения.

Станция управления также имеет внутренние защиты, на пример – тиристорные и транзисторные блоки снабжены датчиком температуры, который контролирует работу вентилятора обдува и в случае критического перегрева отключает СУ. Также имеются и электронные защиты инверторного преобразователя. При срабатывании аппаратной защиты IGBT-модулей на индикаторе появляется сообщение с указанием номера модуля, например «Авар. IGBT1». После срабатывания данной защиты включение двигателя блокируется на время, необходимое для восстановления модуля (15 минут), поэтому при нажатии кнопки «ПУСК» до истечения этого времени на индикаторе появится сообщение «Пауза IGBT». Если аварийная ситуация не привела к разрушению модуля, то

повторный пуск возможен только по истечении указанного времени.

В случае перегрузки СУ по току 125 % от номинального продолжает работать в течение 5 минут при времени усреднения 10 минут (режим №2 в соответствии с ГОСТ 24607-88), затем отключается, если перегрузка выше останов происходит сразу.

Минимальные интервалы между аварийными режимами. Определяется требованиями к восстановлению нормального состояния элементов СУ, трансформатора и двигателя. Как правило, время перерыва не меньше 15 минут: на восстановление электронных блоков СУ и остывание трансформатора и двигателя.

Перед включением СУ в работу происходит согласование уставок защиты ЭП с энергоснабжающей организацией для исключения аварийных остановов СУ из-за несоответствия параметров питающего напряжения или перегрузки силовых линий данной организации.

Погрешность параметров, измеряемых и рассчитываемых контроллером СУ «Электрон-5» не превышает 2,5% от верхнего предела измерения, за исключением сопротивления изоляции цепи «вторичная обмотка ТМПН – погружной кабель – статорная обмотка ПЭД», погрешность которого в диапазоне от 0,5 до 10 МОм составляет 10%. В диапазоне 0 от до 0,5 МОм не более 10%.

Контролер СУ «Электрон-5» для контроля состояния электропривода содержит «Журнал событий», куда заносятся пуски и остановки, а также запись параметров установки через 1 секунду (минимальный параметр уставки), в случае аварии период записей уменьшается, и записную книжку, куда вносятся сведения о двигателе, трансформаторе и др. Содержимое с помощью считывающего устройства (БСИ-04) можно перенести на компьютер и просмотреть с помощью специализированной программы.

Выше рассмотренный электропривод обеспечивает непрерывную работу ЭЦ насоса с заданными параметрами и изменением их без остановки двигателя в течение длительного времени. [5]

#### 4. Выбор защитных устройств

Станция управления «Электрон-5-ПЧ-ТППТ-250-380-50-1 УХЛ1» имеет помимо электронных защит и автоматические выключатели с номинальным током 250 А – для защиты силовой части СУ, и 6 А – для защиты оперативных цепей управления контролером.

Выберем автоматический выключатель, находящийся в КТПН, который предназначен для защиты проводов, кабелей, электрооборудования от короткого замыкания и перегрузок в ПЧ и АД. Для этого должно выполняться следующее условие:

$$I_{\text{сраб.тепл.}} > 1,25 \cdot I_{\text{ном}} = 1,25 \cdot 162 = 202 \text{ А}, \quad (4.1)$$

$$I_{\text{уст.э.о.}} > 1,5 \cdot I_{\text{пуск}} = 1,5 \cdot 249 = 374 \text{ А}, \quad (4.2)$$

где  $I_{\text{сраб.тепл.}}$  – номинальный ток нерегулируемого и регулируемого теплового или комбинированного расцепителя автоматического выключателя;

$I_{\text{уст.э.о.}}$  – ток уставки (срабатывания) электромагнитного расцепителя мгновенного действия (отсечка).

$I_{\text{ном}}$  – ток, потребляемый двигателем  $I_{\text{потр.}}$ .

$I_{\text{пуск}}$  – ток, который потребляет двигатель при линейном разгоне  $I_{\text{потр.р.}}$ .

Для обеспечения селективности выбираем автоматический выключатель типа ВА57-39 с параметрами: [6]

$I_{\text{ном}} = 300 \text{ А}$  – номинальный ток расцепителей с обратозависимой характеристикой;

$I_{\text{о.кз}} = I_{\text{ном}} \cdot 10 = 10 \cdot 300 = 3000 \text{ А}$  – уставка срабатывания по току в зоне КЗ.



Рис. 4.1. Автоматический выключатель ВА57-39.

## 5. Выбор кабельных линий

### 5.1. Кабельные линии для погружных двигателей ЭЦН

ПЭД питается электроэнергией по трехжильному кабелю, спускаемому в скважину параллельно с НКТ. Крепится кабель к внешней поверхности НКТ металлическими хомутами на каждую трубу. Условия работы кабеля сложные, располагается или в нефтяной или газовой средах с высокими температурами и давлениям.

Все кабели, применяемые для УПЦЭН, сверху покрыты эластичной стальной оцинкованной лентой для защиты от механических повреждений. Имеют резиновую (нефтестойкую) или полиэтиленовую изоляцию.

Делятся на круглый или плоский. Вдоль насоса укладывают плоский, так как имеет меньшие габариты, дальше или круглый или плоский. Пример: КРБК означает кабель резиновый бронированный круглый или КПБП - кабель полиэтиленовый бронированный плоский.

Переходы от одного кабеля к другому делают с помощью сросток с применением специальных материалов, обеспечивающих герметизацию соединений.

### 5.2. Выбор высоковольтной кабельной линии

Для выбора сечения кабельной линии между ЧП и двигателем, рассчитаем ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме.

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{н.дв}}}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U} = \frac{76000}{\sqrt{3} \cdot 0,84 \cdot 0,84 \cdot 2400} = 25,7 \text{ А.} \quad (5.1)$$

Выберем плоский кабель КППБПТ 3х16 сечением 16 мм<sup>2</sup>, имеющий двойной слой изоляции из полиэтилена и брони.

Длина линии с учетом подвески УЭЦН на глубине 2300 м и наземного расстояния до СУ 100 м:

$$l = 2400 \text{ м.}$$

Определим потери напряжения на КЛ.

$$R_0 = \frac{(1 + \alpha \cdot (t_{\text{каб}} - 20)) \cdot \rho_{20}}{S}, \quad (5.2)$$

$$R_0 = \frac{(1 + 0,0041 \cdot (120 - 20)) \cdot 0,0195}{16} = 0,0017 \text{ Ом/м},$$

где  $\rho_{20}$  — удельное сопротивление жилы кабеля при 20°C с учетом нагартовки и скрутки, принимается равным 0,0195 Ом-мм<sup>2</sup>/м;  $S$  — площадь сечения жилы кабеля, мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения меди, равный 0,0041/°C,  $t_{\text{каб}}$  — температура жилы кабеля, которую можно при ориентировочных расчетах принять равной средней температуре в стволе скважины.

Потери напряжения при номинальном токе:

$$\Delta U = I_{\text{ном}} \cdot r \cdot \cos\varphi + I_{\text{ном}} \cdot x \cdot \sin\varphi. \quad (5.3)$$

$$r = R_0 \cdot l = 0,0017 \cdot 2400 = 4,08 \text{ Ом}, \quad (5.4)$$

$$x = X_0 \cdot l = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2400 = 0,24 \text{ Ом}. \quad (5.5)$$

По формуле (5.3):

$$\Delta U = 25,7 \cdot (4,08 \cdot 0,84 + 0,24 \cdot 0,54) = 91 \text{ В}.$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{91}{2400} \cdot 100\% = 4,4\%. \quad (5.6)$$

Потери напряжения при разгоне ЭЦН:

$$\Delta U = I_{\text{пуск}} \cdot (r \cdot \cos\varphi + x \cdot \sin\varphi), \quad (5.7)$$

$$\Delta U = 41 \cdot (4,08 \cdot 0,84 + 0,24 \cdot 0,54) = 145,8 \text{ В}.$$

По формуле (5.6):

$$\Delta U\% = \frac{145,8}{2000} \cdot 100\% = 7,3\%.$$

### 5.3. Выбор низковольтных КЛ

КЛ располагаются между КТПН и СУ.

$$I_{\text{потр}} = 162 \text{ А}.$$

Нагрев проводников не должен превышать предельного значения длительно допустимых температур для проводов и кабелей с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией 55°C, в соответствии с которыми в ПУЭ установлены значения  $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{ном}} / (K_{\text{п1}} K_{\text{п2}})$ . [7] Превышение этих



температур приводит к преждевременному старению изоляции проводников и снижает надежность контактов.

По условию нагрева выберем сечение  $70 \text{ мм}^2$ , при котором максимальный длительный ток для четырехжильного кабеля – 185 А.

Определим потери напряжения на 50 м длины КЛ.

$$l = 50 \text{ м}, S = 70 \text{ мм}^2, I_p = 83,9 \text{ А}, \cos\varphi = 0,61.$$

По формуле (5.4):

$$r = \frac{50}{50 \cdot 70} = 14,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

По формуле (5.5):

$$x = 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

По формуле (5.3):

$$\Delta U = 162 \cdot (0,00143 \cdot 0,84 + 0,004 \cdot 0,54) = 0,54 \text{ В}.$$

По формуле (5.6):

$$\Delta U\% = \frac{0,54}{380} \cdot 100\% = 0,14\%.$$

При подключении ЧП потери напряжения не должны превышать 5% от номинального значения питающей сети.

Как видим, выбранное сечение соответствует требованиям.

Выберем бронированный кабель марки **ВБШв4х70**.

Для перемычки между СУ и трансформатором возьмем кабель той же марки, что и питающий **ВБШв4х70** длиной  $l = 5 \text{ м}$ .



Кабель марки **ВБШв4х70**



Плоский кабель **КПпБПТ 3х16**

Рис. 5.1. Кабельные линии УЭЦН.

## 6. Расчет характеристик двигателя

### 6.1. Расчет параметров элементов схемы замещения

Приводом погружных центробежных насосов служит специальный маслозаполненный погружной асинхронный электродвигатель трехфазного переменного тока с короткозамкнутым ротором вертикального исполнения типа ПЭД. Погружной центробежный насос по принципу действия не отличается от обычных центробежных насосов, применяемых для перекачки жидкости. Отличие в том, что он многосекционный с малым диаметром рабочих ступеней – рабочих колес и направляющих аппаратов, питание приходит через повышающий трансформатор и длинный силовой высоковольтный кабель. Как следствие данный двигатель не предназначен для прямого запуска, так как может быстро выйти из строя. Данный режим используется только в крайних случаях, как правило – при срыве насоса с «клина». Соответственно в справочных данных ПЭД не приводятся сведения о перегрузочной способности, которая является основной для расчета сопротивления схемы замещения. [8]

Таблица 6.1.

Паспортные данные асинхронного двигателя ПЭДН-63-117  
для расчетов схемы замещения

	Номинальные величины	Размерность	
1	$P_{н.дв}$	Вт	76000
2	$U_{л1}$	В	2400
3	$f_1$	Гц	60
4	$n_{1.50}$	об/мин	3000
5	$s_n$		0,05
6	$\eta_n$		0,84
7	$\cos \varphi$		0,84

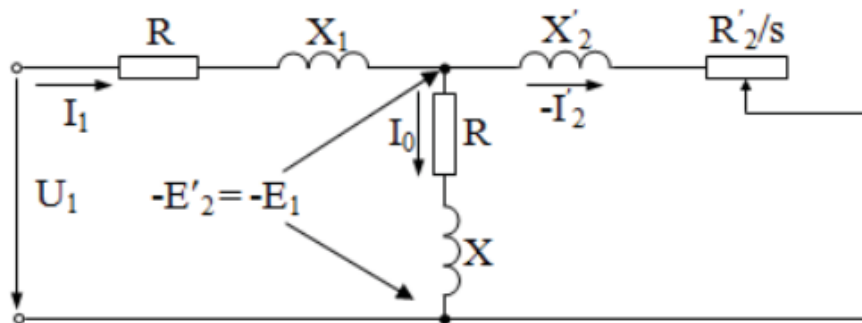


Рис. 6.1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

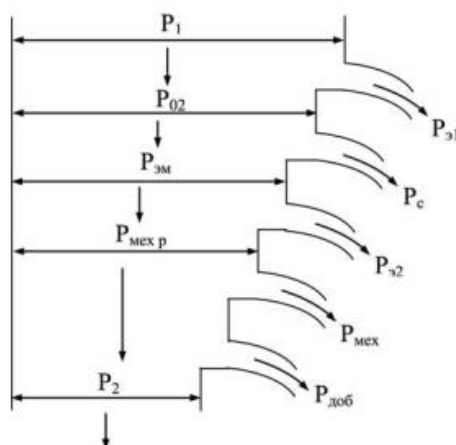


Рис. 6.2. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя с короткозамкнутым двигателем.

Расчеты будем проводить для двигателя с  $f_1 = 60$  Гц.

1. Номинальное фазное напряжение, число пар полюсов, коэффициенты электродвижущих сил (ЭДС) и рассеяния обмотки статора

$$U_1 = \frac{U_{л1}}{\sqrt{3}} = \frac{2400}{\sqrt{3}} = 1386 \text{ В.} \quad (6.1)$$

$$p = 60 \frac{f_{1.50}}{n_{1.50}} = 60 \cdot \frac{50}{3000} = 1. \quad (6.2)$$

$$k_E = 0,985 - 0,005 \cdot p = 0,985 - 0,005 \cdot 1 = 0,98. \quad (6.3)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{k_E} = \frac{1}{0,98} = 1,02. \quad (6.4)$$

Синхронная угловая скорость вращения двигателя при  $f_1 = 60$  Гц:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot f_1 \cdot 60}{30} = \frac{3,14 \cdot 60 \cdot 60}{30} = 376,8 \text{ рад/с.} \quad (6.5)$$

Номинальная частота вращения двигателя при  $f_1 = 60 \text{ Гц}$ :

$$n_{\text{ном}} = (1 - s_{\text{ном}}) \cdot n_{1.60} = (1 - 0,05) \cdot 60 \cdot 60 = 3420 \text{ об/мин.} \quad (6.6)$$

Номинальная угловая скорость вращения двигателя:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3420}{30} = 357,96 \text{ рад/с.} \quad (6.7)$$

2. Номинальный фазный ток обмотки статора и его активная и реактивная составляющие

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{н.дв}}}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{76000}{3 \cdot 1386 \cdot 0,84 \cdot 0,84} = 25,7 \text{ А.} \quad (6.8)$$

$$I_{1a} = I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_n = 25,7 \cdot 0,84 = 21,7 \text{ А.} \quad (6.9)$$

$$I_{1p} = I_{\text{ном}} \cdot \sin \varphi_n = 25,7 \cdot 0,54 = 13,9 \text{ А.} \quad (6.10)$$

3. Приведенные значения активного сопротивления обмотки ротора и ее номинального тока (получено с использованием [9,10,11]):

$$R'_2 = S_n \cdot \frac{U_1}{I_1} = 0,05 \cdot \frac{1386}{25,7} = 2,69 \text{ Ом.} \quad (6.11)$$

$$I'_2 = I_{\text{ном}} \cdot (0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi_n) = 25,7 \cdot (0,2 + 0,8 \cdot 0,84) = 22,5 \text{ А.} \quad (6.12)$$

4. Электрические потери в обмотке ротора, номинальные значения электромагнитной мощности машины и механической мощности ротора (по рисункам 1 и 2)

$$P_{\text{э2}} = m_1 \cdot R'_2 \cdot (I'_2)^2 = 3 \cdot 2,69 \cdot 22,5^2 = 4085 \text{ Вт.} \quad (6.13)$$

$$P_{\text{эмн}} = m_1 \cdot \left( \frac{R'_2}{S_n} \right) \cdot (I'_2)^2 = 3 \cdot \left( \frac{2,69}{0,05} \right) \cdot 22,5^2 = 81709 \text{ Вт.} \quad (6.14)$$

$$P_{\text{мехрн}} = P_{\text{эмн}} \cdot (1 - S_n) = 81709 \cdot (1 - 0,05) = 77624 \text{ Вт.} \quad (6.15)$$

5. Номинальная потребляемая мощность и некоторые вспомогательные мощности

$$P_{1H} = \frac{P_{H,ДВ}}{\eta_H} = \frac{76000}{0,84} = 90476 \text{ Вт.} \quad (6.16)$$

$$P''_{\text{мехрн}} = P_{\text{мехрн}} \cdot \sqrt[4]{1 - S_H} = 77624 \cdot \sqrt[4]{1 - 0,05} = 76635 \text{ Вт.} \quad (6.17)$$

$$P'_{02} \approx 0,5 \cdot (\sqrt{P_{ЭМН}} + \sqrt{P_{H,ДВ}}) \cdot \sqrt{P_{1H}}, \quad (6.18)$$

$$P'_{02} = 0,5 \cdot (\sqrt{81709} + \sqrt{76000}) \cdot \sqrt{90476} = 84452 \text{ Вт.}$$

$$P''_{02} \approx 0,5 \cdot \left( \sqrt{P_{ЭМН}} + \sqrt{P''_{\text{мехрн}}} \right) \cdot \sqrt{P_{1H}}, \quad (6.19)$$

$$P''_{02} = 0,5 \cdot (\sqrt{81709} + \sqrt{76635}) \cdot \sqrt{90476} = 84625 \text{ Вт.}$$

6. Первое и второе приближения электрических потерь в обмотке статора, ее активного сопротивления, а также нахождение искомого значения этого сопротивления и электрических потерь в обмотке статора (рис. 6.2)

$$P'_{Э1} = P_{1H} - P'_{02} = 90476 - 84452 = 6024 \text{ Вт.} \quad (6.20)$$

$$P''_{Э1} = P_{1H} - P''_{02} = 90476 - 84625 = 5851 \text{ Вт.} \quad (6.21)$$

$$R'_1 = \frac{P'_{Э1}}{m_1 \cdot (I'_2)^2} = \frac{6024}{3 \cdot 25,7^2} = 3,04 \text{ Ом.} \quad (6.22)$$

$$R''_1 = \frac{P''_{Э1}}{m_1 \cdot (I'_2)^2} = \frac{5851}{3 \cdot 25,7^2} = 2,95 \text{ Ом.} \quad (6.23)$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = 0,5 \cdot (R'_1 + R''_1) = 0,5 \cdot (3,04 + 2,95) = 3 \text{ Ом.} \quad (6.24)$$

$$P_{Э1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_H^2 = 3 \cdot 3 \cdot 25,7^2 = 5944 \text{ Вт.} \quad (6.25)$$

7. Мощность асинхронного двигателя за вычетом электрических потерь в обмотке статора, а также потери в стали определяются по энергетической диаграмме на рис. 6.2:

$$P_{02} = P_{1H} - P_{Э1} = 90476 - 5944 = 84532 \text{ Вт.} \quad (6.26)$$

$$P_c = P_{02} - P_{ЭМН} = 84532 - 81709 = 2823 \text{ Вт.} \quad (6.27)$$

8. С помощью рис. 6.1 определяются следующие физические величины:

$$I''_2 = \frac{I'_2}{\sigma_1} = \frac{22,5}{1,02} = 22,06 \text{ A.} \quad (6.28)$$

$$Z''_2 = \frac{U_1}{I''_2} = \frac{1386}{22,06} = 62,83 \text{ Ом.} \quad (6.29)$$

$$R''_2 = \sigma_1 \cdot R_1 + \sigma_1^2 \cdot \frac{R'_2}{s_H} = 1,02 \cdot 3 + 1,02^2 \cdot \frac{2,69}{0,05} = 57,94 \text{ Ом.} \quad (6.30)$$

$$X''_2 = \sqrt{Z''_2^2 - R''_2^2} = \sqrt{62,83^2 - 57,94^2} = 24,31 \text{ Ом.} \quad (6.31)$$

$$\cos \varphi''_2 = \frac{R''_2}{Z''_2} = \frac{57,94}{62,83} = 0,92. \quad (6.32)$$

$$I''_{2a} = I''_2 \cdot \cos \varphi''_2 = 22,06 \cdot 0,92 = 20,3 \text{ A.} \quad (6.33)$$

$$I''_{2p} = I''_2 \cdot \sin \varphi''_2 = 22,06 \cdot 0,39 = 8,6 \text{ A.} \quad (6.34)$$

$$I_{00a} = I_{1a} - I''_{2a} = 21,7 - 20,3 = 1,4 \text{ A.} \quad (6.35)$$

$$I_{00p} = I_{1p} - I''_{2p} = 13,9 - 8,6 = 5,3 \text{ A.} \quad (6.36)$$

Ток холостого хода:

$$I_{00} = \sqrt{I_{00a}^2 + I_{00p}^2} = \sqrt{1,4^2 + 5,3^2} = 5,5 \text{ A.} \quad (6.37)$$

$$Z_{00} = \frac{U_1}{I_{00}} = \frac{1386}{5,5} = 252 \text{ Ом.} \quad (6.38)$$

$$\cos \varphi_{00} = \frac{I_{00a}}{I_{00}} = \frac{1,4}{5,5} = 0,25. \quad (6.39)$$

$$\sin \varphi_{00} = \frac{I_{00p}}{I_{00}} = \frac{5,3}{5,5} = 0,96. \quad (6.40)$$

$$R_{00} = Z_{00} \cdot \cos \varphi_{00} = 252 \cdot 0,25 = 63 \text{ Ом.} \quad (6.41)$$

$$X_{00} = Z_{00} \cdot \sin \varphi_{00} = 252 \cdot 0,96 = 242 \text{ Ом.} \quad (6.42)$$

$$R_0 = R_{00} - R_1 = 63 - 3 = 60 \text{ Ом.} \quad (6.43)$$

$$X_0 = \frac{X_{00}}{\sigma_1} = \frac{242}{1,02} = 237 \text{ Ом.} \quad (6.44)$$

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = \sqrt{60^2 + 237^2} = 244 \text{ Ом.} \quad (6.45)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{1\sigma} = (\sigma_1 - 1) \cdot X_{00} = (1,02 - 1) \cdot 242 = 4,84 \text{ Ом.} \quad (6.46)$$

9. Далее вычисляются величины:

$$I'''_2 = \sigma_1 \cdot I'_2 = 22,5 \cdot 1,02 = 22,95 \text{ А.} \quad (6.47)$$

$$R'''_2 = R_1 + \frac{R'_2}{S_H} = 3 + \frac{2,69}{0,05} = 56,8 \text{ Ом.} \quad (6.48)$$

$$Z'''_2 = \frac{U_1}{I'''_2} = \frac{1386}{22,95} = 60,4 \text{ Ом.} \quad (6.49)$$

$$X_{kH} = X'''_2 = \sqrt{Z'''_2^2 - R'''_2^2} = \sqrt{60,4^2 - 56,8^2} = 20,5 \text{ Ом.} \quad (6.50)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$X'_{2\sigma} = X_{kH} - X_{1\sigma} = 20,5 - 4,84 = 15,66 \text{ Ом.} \quad (6.51)$$

$$E'_2 = E_1 = Z_0 \cdot I_{00} = 244 \cdot 5,5 = 1342 \text{ В.} \quad (6.52)$$

$$k_E = \frac{E_1}{U_1} = \frac{1342}{1386} = 0,98. \quad (6.53)$$

Таблица 6.2.

Значения сопротивлений, полученные по вышеприведенному алгоритму.

№	Сопротивления	Размерность	Значение
1	$R_1$	Ом	3
2	$X_1$	Ом	4,8
3	$R'_2$	Ом	2,69
4	$X'_2$	Ом	15,7
5	$X_k$	Ом	20,5
6	$X_0$	Ом	242
7	$Z_0$	Ом	252

## 6.2. Расчет и построение естественных характеристик АД

Расчет и построение характеристик проведем с помощью программы Mathcad 15.

### 6.2.1. Расчет и построение естественной механической характеристики электродвигателя

Момент критический двигательного режима:

$$M_K = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_{\text{НОМ}} \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{КН}}^2} \right]}, \quad (6.54)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot 1386^2}{2 \cdot 298,3 \cdot \left[ 3 + \sqrt{3^2 + 20,5^2} \right]} = 322 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критическое скольжение:

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} = \pm \frac{2,69}{\sqrt{3^2 + 20,5^2}} = \pm 0,13. \quad (6.55)$$

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$M(s) = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]}, \quad (6.56)$$

$$\begin{aligned} M(s) &= \frac{3 \cdot 1386^2 \cdot 2,69}{376,8 \cdot s \cdot \left[ \left( 3 + \frac{2,69}{s} \right)^2 + (4,8 + 15,7)^2 \right]} = \\ &= \frac{43303}{s \cdot \left[ \left( 3 + \frac{2,69}{s} \right)^2 + 420,25 \right]} \end{aligned}$$

Численные значения механической характеристики сведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3.

Численные значения механической характеристики

$s$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$w$	0	36	72	107	143	179	215	251	286	322	378
$M$	90	100	112	126	144	168	200	243	298	313	0



Механическая характеристика зависимости частоты вращения ротора асинхронного электродвигателя от момента, приложенного к нему, изображен на рис. 6.3.

$$w(s, f) = w_0(f) \cdot (1 - s). \quad (6.57)$$

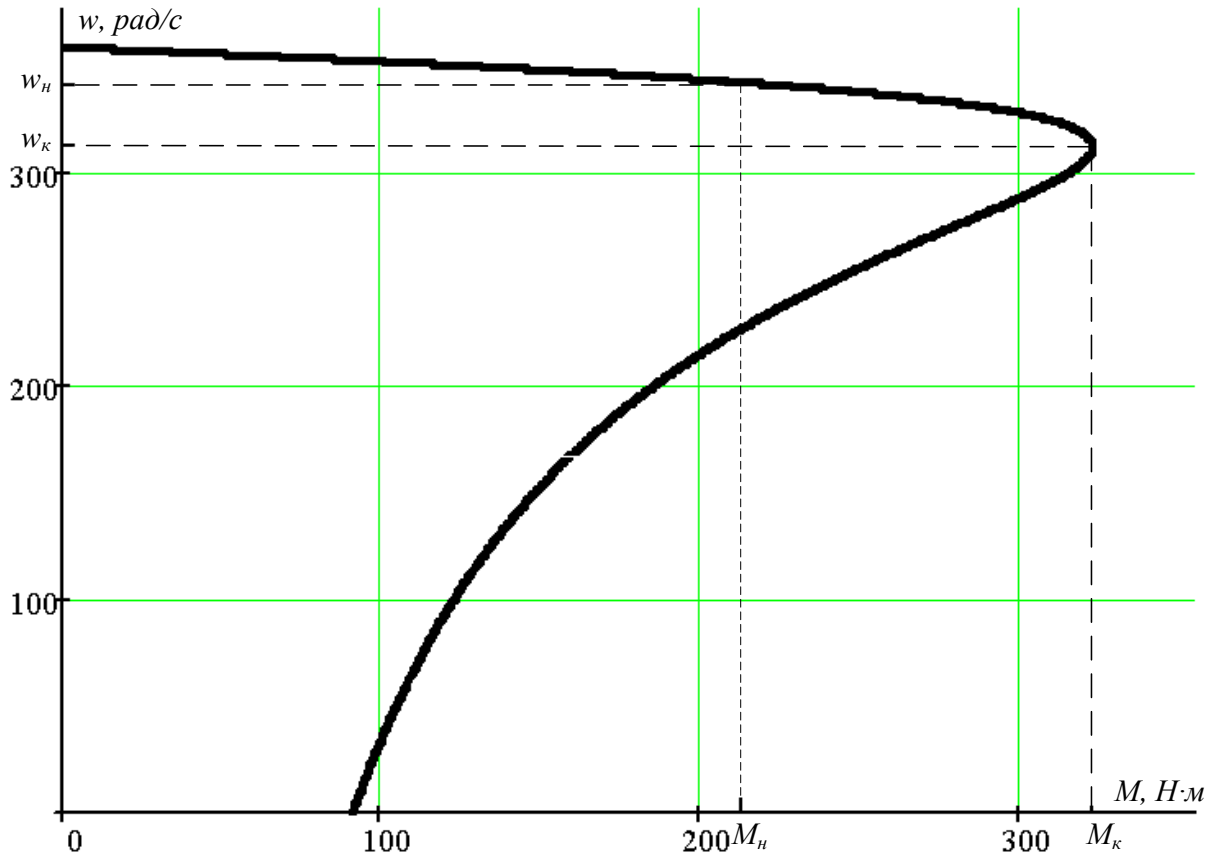


Рис. 6.3. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

### 6.2.2. Расчет и построение естественных электромеханических характеристик ротора и статора электродвигателя

Зависимость тока ротора  $I'_2$ , приведенного к обмотке статора, от скольжения  $S$  определяется следующим образом:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_n^2}} = \frac{1386}{\pm \sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{S}\right)^2 + 20,5^2}}, \quad (6.58)$$

$$I'_2 = \frac{1386}{\pm \sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{S}\right)^2 + 420,25}}.$$

Численные значения характеристики тока ротора сведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4.

Численные значения характеристики тока ротора

$s$	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$w$	754	678	603	528	452	377	301	226	151	75	0
$I'_2$	68	68	67	67	60	0	53	61	64	65	65

График электромеханической характеристики  $\omega = f(I'_2)$  см. рис. 6.4.

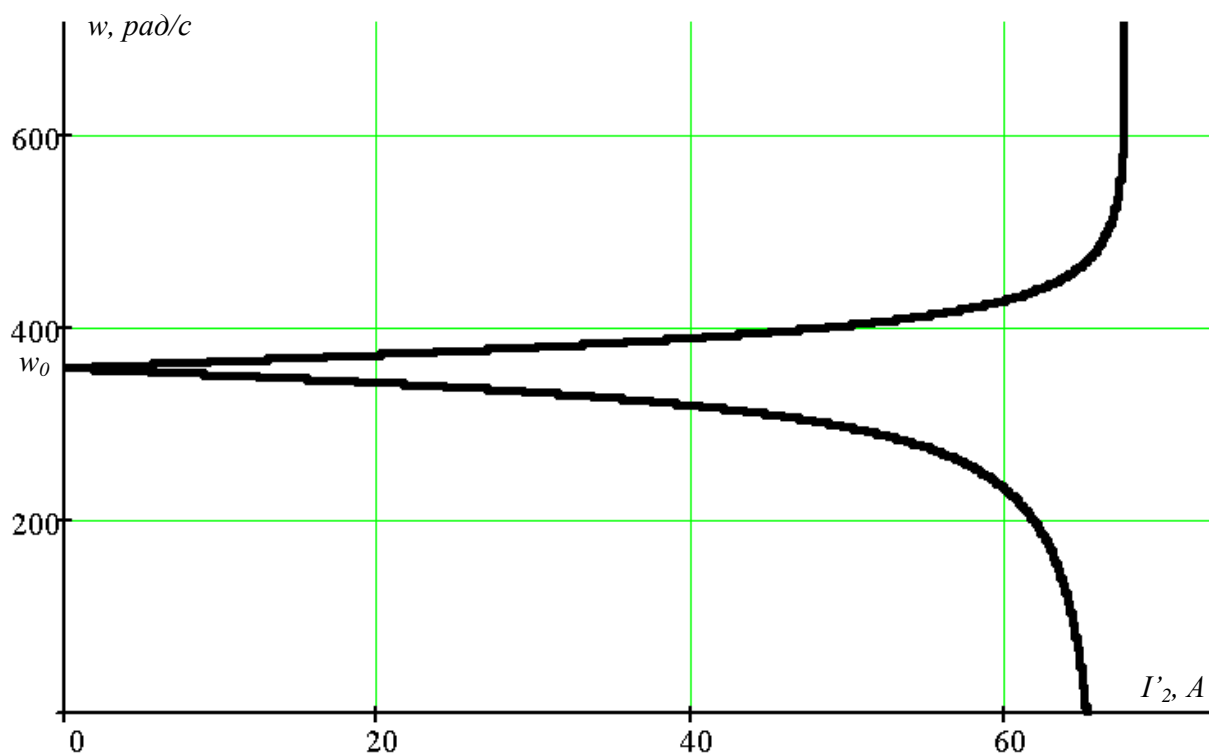


Рис. 6.4. График электромеханической характеристики  
тока обмотки ротора  $\omega = f(I'_2)$

Электромеханическая характеристика тока обмотки статора определяется следующим выражением:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I'_2{}^2 + 2 I_0 \cdot I'_2 \cdot \sin \varphi_2}, \quad (6.59)$$

$$I_1 = \sqrt{5,5^2 + I'_2{}^2 + 2 \cdot 5,5 \cdot I'_2 \cdot \sin \varphi_2},$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{20,5}{\sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2}}. \quad (6.60)$$

Численные значения характеристики тока статора сведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5.

Численные значения характеристики тока статора

$s$	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\sin \varphi_2$	1,000	1,000	0,997	0,984	0,891	0,000	0,780	0,903	0,939	0,955	0,964
$w$	754	678	603	528	452	377	301	226	151	75	0
$I_1$	73	73	73	72	65	6	57	66	69	70	70

Электромеханические характеристики статора двигателя см. рис. 6.5.

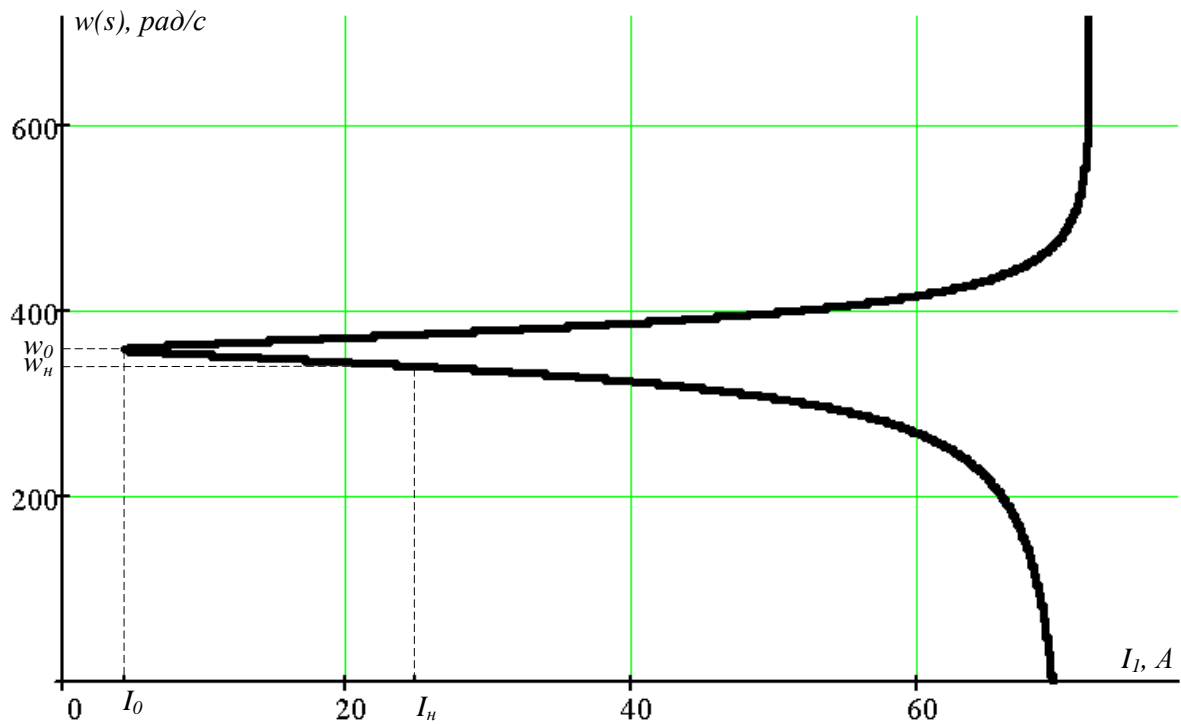


Рис. 6.5. График естественной электромеханической характеристики

$I_1 = f(s)$  асинхронного двигателя

Номинальный ток ротора определим при номинальном скольжении:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{\text{к}}^2}} = \frac{1386}{\pm \sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{0,05}\right)^2 + 20,5^2}} = 23 \text{ А.} \quad (6.61)$$

Синус угла между вектором фазного напряжения  $\overline{U_{1\phi}}$  и сопряженным вектором тока ротора  $\overline{I'_2}$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{\kappa}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{\kappa}^2}} = \frac{20,5}{\sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{0,05}\right)^2 + 20,5^2}} = 0,343. \quad (6.62)$$

Номинальный ток статора двигателя

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I'_2{}^2 + 2 I_0 \cdot I'_2 \cdot \sin \varphi_{2H}}, \quad (6.63)$$

$$I_1 = \sqrt{5,5^2 + 23^2 + 2 \cdot 5,5 \cdot 23 \cdot 0,344} = 25,4 \text{ A.}$$

## 7. Расчет характеристик для системы ПЧ-АД

### 7.1. Расчёт искусственных (регулирующих) характеристик электропривода в системе «ПЧ-АД» $\omega = f(I)$ , $\omega = f(M)$ для определенного диапазона регулирования скорости

Расчет характеристик производится для частот  $f_1=60; 50; 40; 30$  Гц, так как приемлемый КПД электроцентробежного насоса обеспечивается в этом диапазоне частот питающего напряжения.

При законе регулирования:

$$Z_p = \frac{U_{1H}}{f^3} = \frac{1386}{60^3} = 0,0064. \quad (7.1)$$

Относительные значения частот питающего напряжения:

$$\text{при } f_{1H1}=60 \text{ Гц} \quad f_{1.1} = \frac{f_{1H}}{f_{1H}} = \frac{60}{60} = 1; \quad (7.2)$$

$$\text{при } f_{1H2}=50 \text{ Гц} \quad f_{1.2} = \frac{f_{2H}}{f_{1H}} = \frac{50}{60} = 0,83; \quad (7.3)$$

$$\text{при } f_{1H3}=40 \text{ Гц} \quad f_{1.3} = \frac{f_{3H}}{f_{1H}} = \frac{40}{60} = 0,67; \quad (7.4)$$

$$\text{при } f_{1H4}=30 \text{ Гц} \quad f_{1.4} = \frac{f_{4H}}{f_{1H}} = \frac{30}{60} = 0,5. \quad (7.5)$$

Фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{1H1} = Z_p \cdot f_{1H1}^3 = 0,0064 \cdot 60^3 = 1386 \text{ В}; \quad (7.6)$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2}^3 = 0,0064 \cdot 50^3 = 802 \text{ В}; \quad (7.7)$$

$$U_{1H3} = Z_p \cdot f_{1H3}^3 = 0,0064 \cdot 40^3 = 411 \text{ В}; \quad (7.8)$$

$$U_{1H4} = Z_p \cdot f_{1H4}^3 = 0,0064 \cdot 30^3 = 173 \text{ В}. \quad (7.9)$$

В соответствии с представленными частотами питающего напряжения произведем расчет значений скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{01} = \frac{2\pi \cdot f_{1H1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 60}{1} = 377 \text{ рад/с}; \quad (7.10)$$

$$\omega_{02} = \frac{2\pi \cdot f_{1H2}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314 \text{ рад/с}; \quad (7.11)$$

$$\omega_{03} = \frac{2\pi \cdot f_{1H3}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40}{1} = 251 \text{ рад/с}; \quad (7.12)$$

$$\omega_{04} = \frac{2\pi \cdot f_{1H4}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{1} = 188 \text{ рад/с}. \quad (7.13)$$

Токи холостого хода при данных частотах регулирования:

$$I_{01} = \frac{U_{1H1}}{X_{\mu H} \cdot f_{1.1}} = \frac{1386}{252 \cdot 1} = 5,5 \text{ A}; \quad (7.14)$$

$$I_{02} = \frac{U_{1H2}}{X_{\mu H} \cdot f_{1.2}} = \frac{802}{252 \cdot 0,83} = 3,8 \text{ A}; \quad (7.15)$$

$$I_{03} = \frac{U_{1H3}}{X_{\mu H} \cdot f_{1.3}} = \frac{411}{252 \cdot 0,67} = 2,4 \text{ A}; \quad (7.16)$$

$$I_{04} = \frac{U_{1H4}}{X_{\mu H} \cdot f_{1.4}} = \frac{173}{252 \cdot 0,5} = 1,4 \text{ A}. \quad (7.17)$$

Электромеханические характеристики (рис. 7.1)  $I'_2(\omega)$  для выбранных частот строятся по выражениям:

$$I'_2(f, s) = \frac{U_{1H}(f)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}(f)^2 + \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}}}. \quad (7.18)$$

$$(f, s) = w_0(f) \cdot (1 - s). \quad (7.19)$$

$$I'_2(f_{1H}, s) = \frac{1386}{\pm \sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 1^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 1,2}}};$$

$$I'_2(f_{2H}, s) = \frac{802}{\pm \sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,83^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 1}}};$$

$$I'_2(f_{3H}, s) = \frac{411}{\pm \sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,67^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 0,8}}};$$

$$I'_2(f_{4H}, s) = \frac{173}{\pm \sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,5^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 0,6}}}.$$

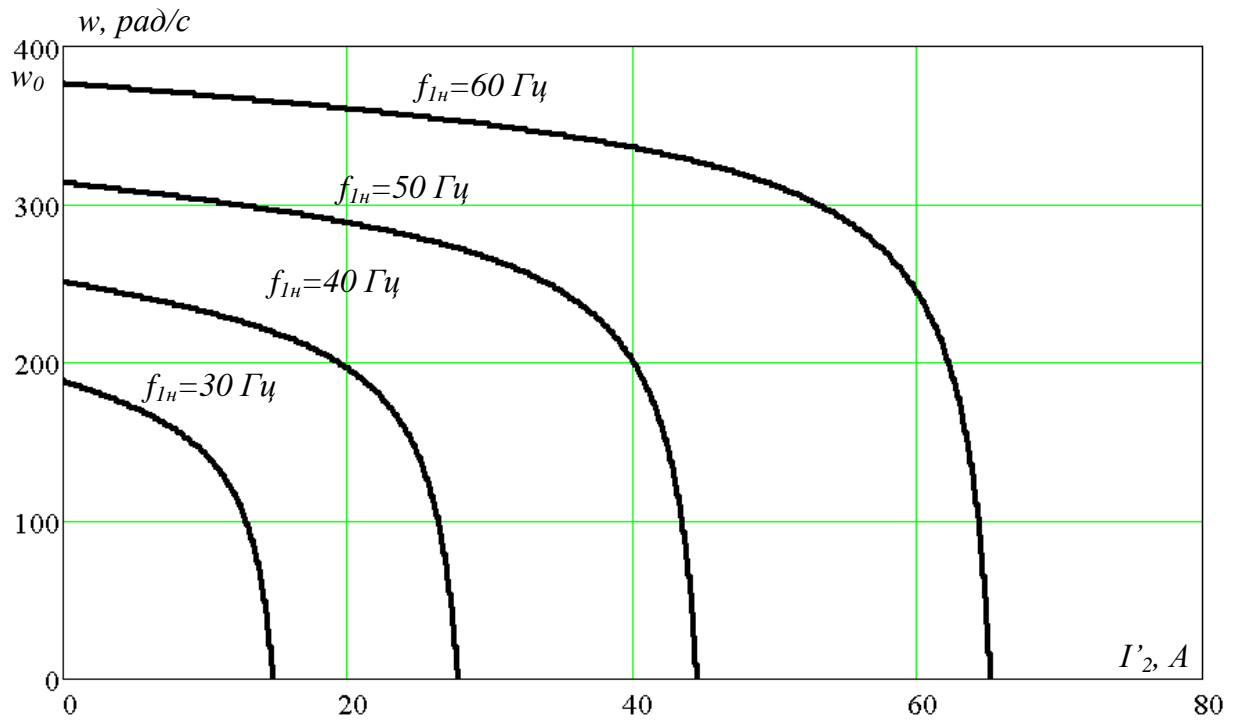


Рис. 7.1. Регулировочные электромеханические характеристики  $I'_2(w)$

Также произведем расчет электромеханических характеристик  $I_1(w)$  (рис. 7.2):

$$I_1(f, s) =$$

$$\sqrt{I_0(f)^2 + I'_2(f, s)^2 + 2 I_0(f) \cdot I'_2(f, s) \cdot \sin \varphi_2(f, s)}, \quad (7.20)$$

$$\sin \varphi_2(f, s) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}}. \quad (7.21)$$

$$I_1(f_{1H}, s) = \sqrt{5,5^2 + I'_2(f_{1H}, s)^2 + 2 \cdot 5,5 \cdot I'_2(f_{1H}, s) \cdot \sin \varphi_2(f_{1H}, s)},$$

$$\sin \varphi_2(f_{1H}, s) = \frac{20,5 \cdot 1}{\sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 1^2}};$$

$$I_1(f_{2H}, s) = \sqrt{3,8^2 + I'_2(f_{2H}, s)^2 + 2 \cdot 3,8 \cdot I'_2(f_{2H}, s) \cdot \sin \varphi_2(f_{2H}, s)},$$

$$\sin \varphi_2(f_{2H}, s) = \frac{20,5 \cdot 0,83}{\sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,83^2}};$$

$$I_1(f_{3H}, s) = \sqrt{2,4^2 + I'_2(f_{3H}, s)^2 + 2 \cdot 2,4 \cdot I'_2(f_{3H}, s) \cdot \sin \varphi_2(f_{3H}, s)},$$

$$\sin \varphi_2 (f_{3H}, s) = \frac{20,5 \cdot 0,67}{\sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,67^2}};$$

$$I_1(f_{4H}, s) = \sqrt{1,4^2 + I'_2(f_{4H}, s)^2 + 2 \cdot 1,4 \cdot I'_2(f_{4H}, s) \cdot \sin \varphi_2(f_{4H}, s)},$$

$$\sin \varphi_2 (f_{4H}, s) = \frac{20,5 \cdot 0,5}{\sqrt{\left(3 + \frac{2,69}{s}\right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,5^2}}.$$

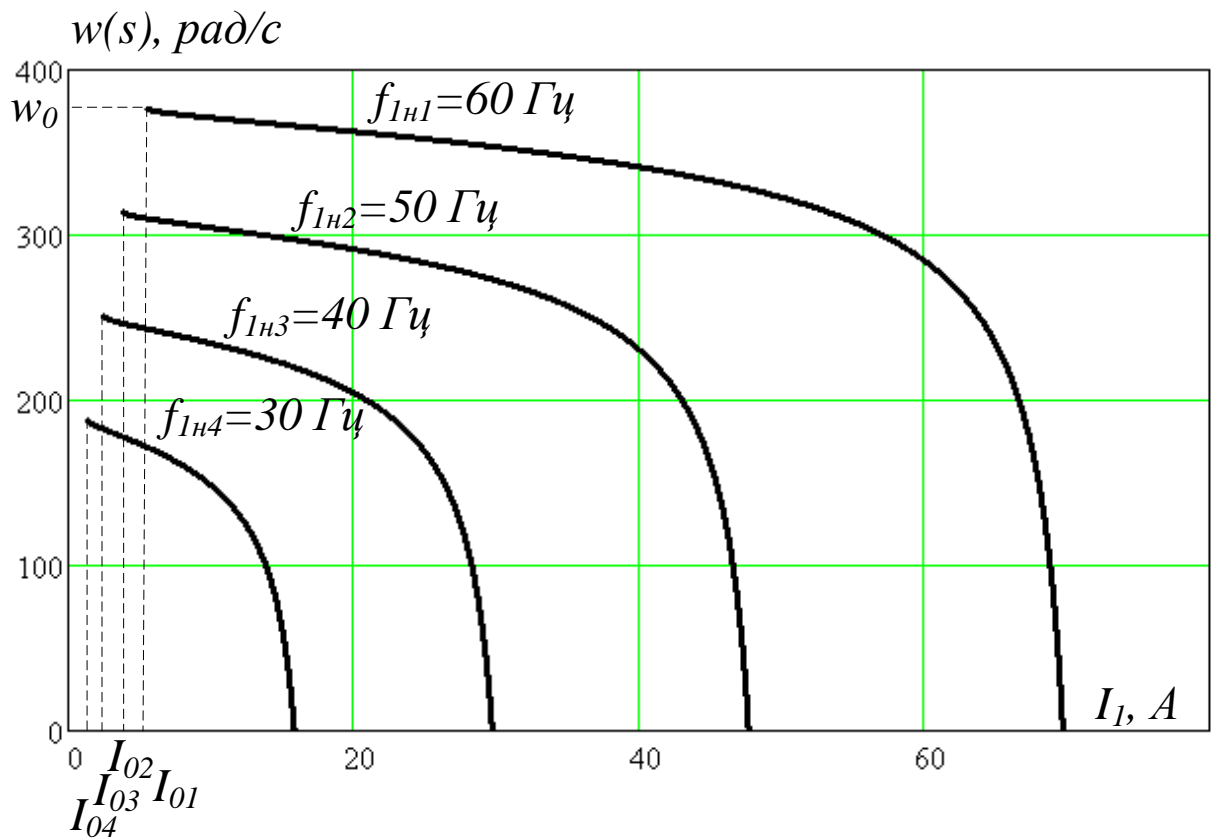


Рис. 7.2. Регулировочные электрохимические характеристики  $I_1(w)$ .

Расчет механических характеристик асинхронного двигателя  $M(\omega)$  по выражениям:

$$M(s, f) = \frac{m_1 \cdot U_{1H}(f)^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}(f)^2 + \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right]}; \quad (7.22)$$



$$M(f_{1H}, s) = \frac{3 \cdot 1386^2 \cdot 3}{377 \cdot s \cdot \left[ \left( 3 + \frac{2,69}{s} \right)^2 + 20,5^2 \cdot 1,2^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 1,2} \right]};$$

$$M(f_{2H}, s) = \frac{3 \cdot 802^2 \cdot 3}{376,8 \cdot s \cdot \left[ \left( 3 + \frac{2,69}{s} \right)^2 + 20,5^2 \cdot 1^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 1} \right]};$$

$$M(f_{3H}, s) = \frac{3 \cdot 411^2 \cdot 3}{251 \cdot s \cdot \left[ \left( 3 + \frac{2,69}{s} \right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,8^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 0,8} \right]};$$

$$M(f_{4H}, s) = \frac{3 \cdot 173^2 \cdot 3}{188 \cdot s \cdot \left[ \left( 3 + \frac{2,69}{s} \right)^2 + 20,5^2 \cdot 0,6^2 + \frac{3 \cdot 2,69}{s \cdot 242 \cdot 0,6} \right]};$$

Критические момент и скольжение можно определить по выражениям:

$$M_K(f) = \frac{3 \cdot U_{1H}(f)^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}(f)^2 \cdot \left( 1 + \frac{R_1^2}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right)} \right]}; \quad (7.22)$$

$$M_K(f_{1H}) = \frac{3 \cdot 1386^2}{2 \cdot 377 \cdot \left[ 3 + \sqrt{3^2 + 20,5^2 \cdot 1,2^2 \cdot \left( 1 + \frac{3^2}{242 \cdot 1,2} \right)} \right]} = 322 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_K(f_{2H}) = \frac{3 \cdot 802^2}{2 \cdot 376,8 \cdot \left[ 3 + \sqrt{3^2 + 20,5^2 \cdot 1^2 \cdot \left( 1 + \frac{3^2}{242 \cdot 1} \right)} \right]} = 151 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_K(f_{3H}) = \frac{3 \cdot 411^2}{2 \cdot 251 \cdot \left[ 3 + \sqrt{3^2 + 20,5^2 \cdot 0,8^2 \cdot \left( 1 + \frac{3^2}{242 \cdot 0,8} \right)} \right]} = 59 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_K(f_{4H}) = \frac{3 \cdot 173^2}{2 \cdot 188 \cdot \left[ 3 + \sqrt{3^2 + 20,5^2 \cdot 0,6^2 \cdot \left( 1 + \frac{3^2}{242 \cdot 0,6} \right)} \right]} = 17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$s_K(f) = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1^2}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}}{R_1^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}(f)^2}}, \quad (7.23)$$

$$s_K(f_{1H}) = 0,13, \quad w(s_K, f_{1H}) = 322 \text{ рад/с}; \quad (7.24)$$

$$s_K(f_{2H}) = 0,16, \quad w(s_K, f_{2H}) = 264 \text{ рад/с}; \quad (7.25)$$

$$s_K(f_{3H}) = 0,20, \quad w(s_K, f_{3H}) = 202 \text{ рад/с}; \quad (7.26)$$

$$s_K(f_{4H}) = 0,26, \quad w(s_K, f_{1H}) = 139 \text{ рад/с}, \quad (7.27)$$

Расчёт функции нагрузки произведён далее. Момент трения примем  $M_0 = 1,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . При частоте  $f_{1H1} = 50 \text{ Гц}$  нагрузка проходит через точку номинального режима двигателя. Коэффициент  $k$  при этом равен:

$$k = \frac{M_H - M_0}{\omega_H^3} = \frac{212 - 1,2}{357,96^3} = 0,0000046. \quad (7.28)$$

Насосная нагрузка описывается функцией:

$$M_{\text{нас.}} = M_0 + k \cdot \omega^3 = 1,2 + 0,0000046 \cdot \omega^3. \quad (7.29)$$

Механические характеристики двигателя и нагрузки, представлены на рис. 7.3.

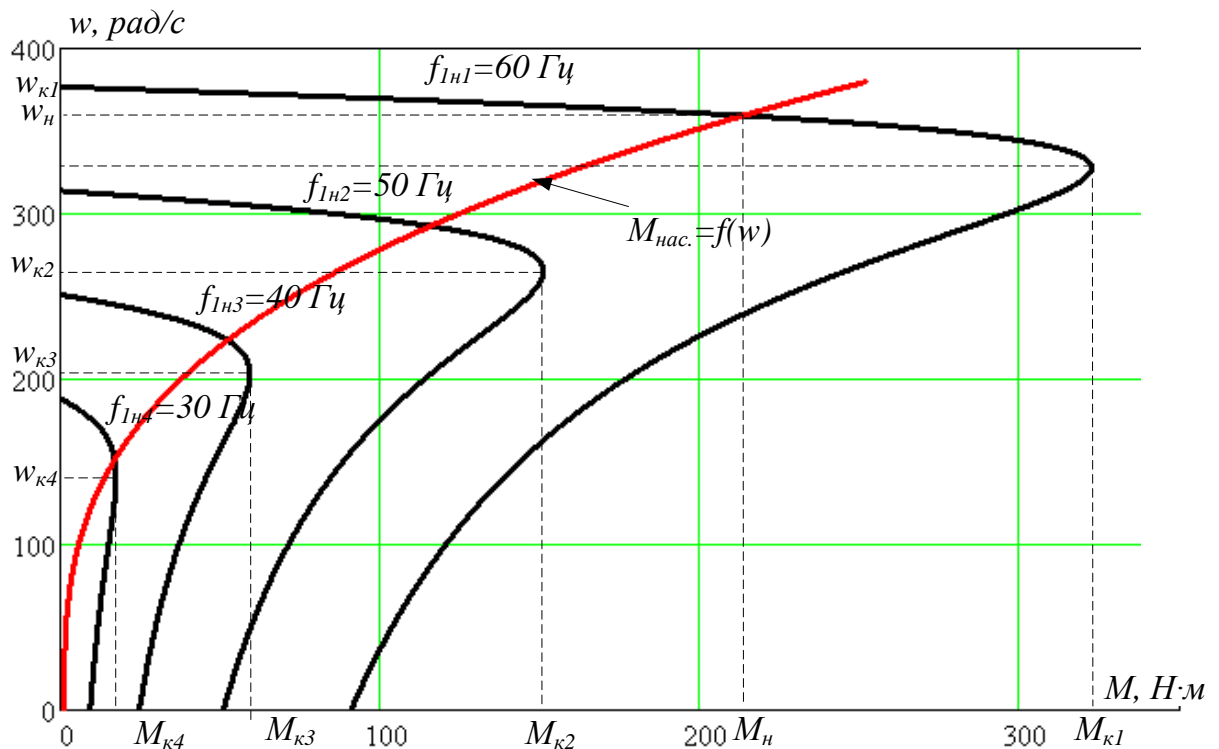


Рис. 7.3 Искусственные механические характеристики  $M(\omega)$

## 7.2. Расчёт регулировочных характеристик электропривода в системе «ПЧ-АД» $\omega = f(I)$ , $\omega = f(M)$ для определенного диапазона регулирования скорости с учетом ИР-компенсации

В связи с тем, что при малых скоростях разгона двигателя в классе законов  $E_{1j}/f_{1j}$  на активном сопротивлении статора падает напряжение, и его необходимо компенсировать на величину  $U_{1j} = E_{1j} + I_1 R_1$ , произведем расчет характеристик с учетом ИР-компенсации.

Коэффициенты компенсации:  $K_{KM}=0; 0,25; 0,5; 0,75$ .

Рассчитаем эквивалентные активные сопротивления статорной цепи при компенсации:

$$R_{1\text{экв}1} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1}) = 3 \cdot (1 - 0) = 3 \text{ Ом}; \quad (7.30)$$

$$R_{1\text{экв}2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM2}) = 3 \cdot (1 - 0,25) = 2,25 \text{ Ом}; \quad (7.31)$$

$$R_{1\text{экв}3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}) = 3 \cdot (1 - 0,5) = 1,5 \text{ Ом}; \quad (7.32)$$

$$R_{1\text{экв}4} = R_1 \cdot (1 - K_{KM4}) = 3 \cdot (1 - 0,75) = 0,75 \text{ Ом}; \quad (7.33)$$

Построим электромеханические характеристики  $I'_2(\omega)$  (см. рис. 7.4.) для выбранных коэффициентов  $K_{KM}$  по формуле:

$$I'_2(f, s, K_{KM}) = \frac{U_{1H}(f)}{\pm \sqrt{\left(R_{1\text{экв}}(K_{KM}) + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}(f)^2 + \frac{R_{1\text{экв}}(K_{KM}) \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}}}; \quad (7.34)$$

Таким же образом построим электромеханические характеристики (рис. 7.5)  $I_1(\omega)$  для выбранных коэффициентов  $K_{KM}$  по формулам:

$$I_1(f, s, K_{KM}) = \sqrt{I_0(f)^2 + I'_2(f, s, K_{KM})^2 + 2 I_0(f) \cdot I'_2(f, s, K_{KM}) \cdot \sin \varphi_2(f, s, K_{KM})}, \quad (7.35)$$

$$\text{где} \quad \sin \varphi_2(f, s) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1(K_{KM}) + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}}. \quad (7.36)$$

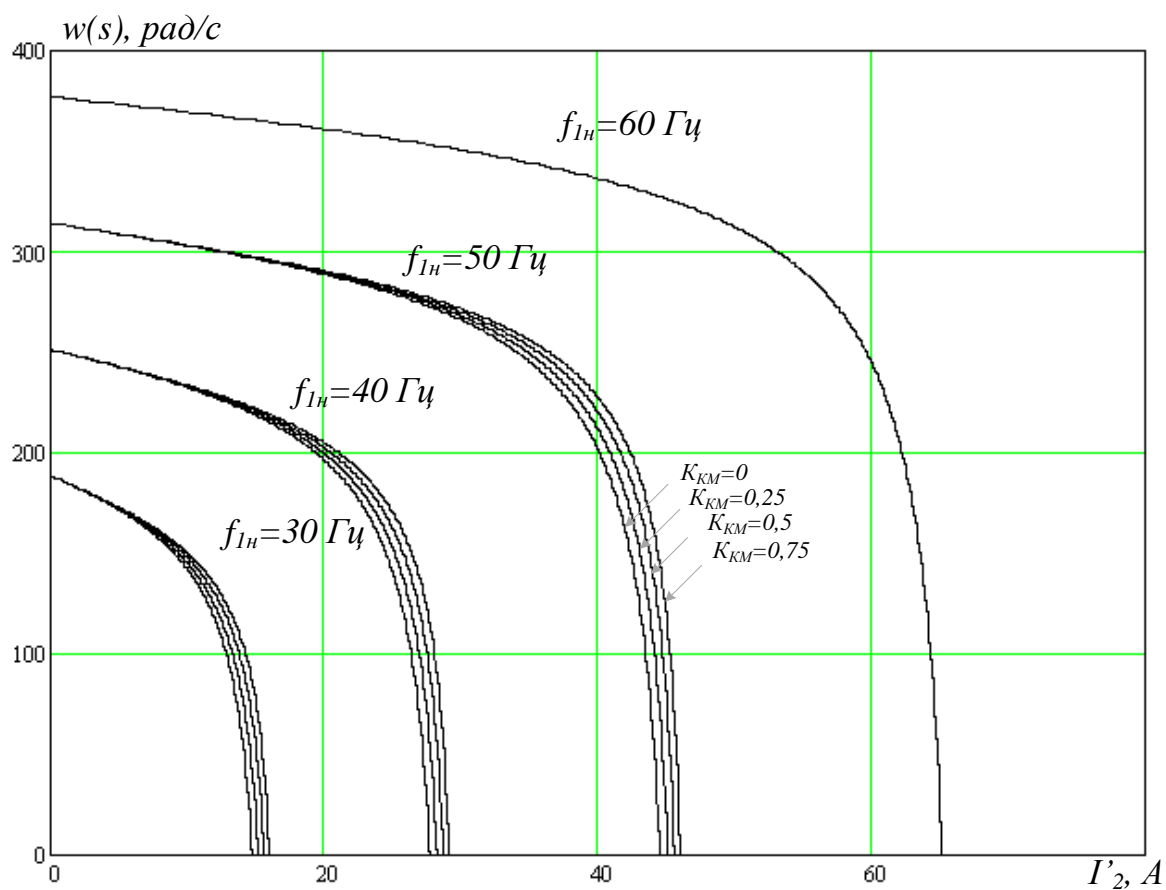


Рис. 7.4. Искусственные электромеханические характеристики  $\Gamma_2(\omega)$  при частотном регулировании скорости с  $IR$  – компенсацией

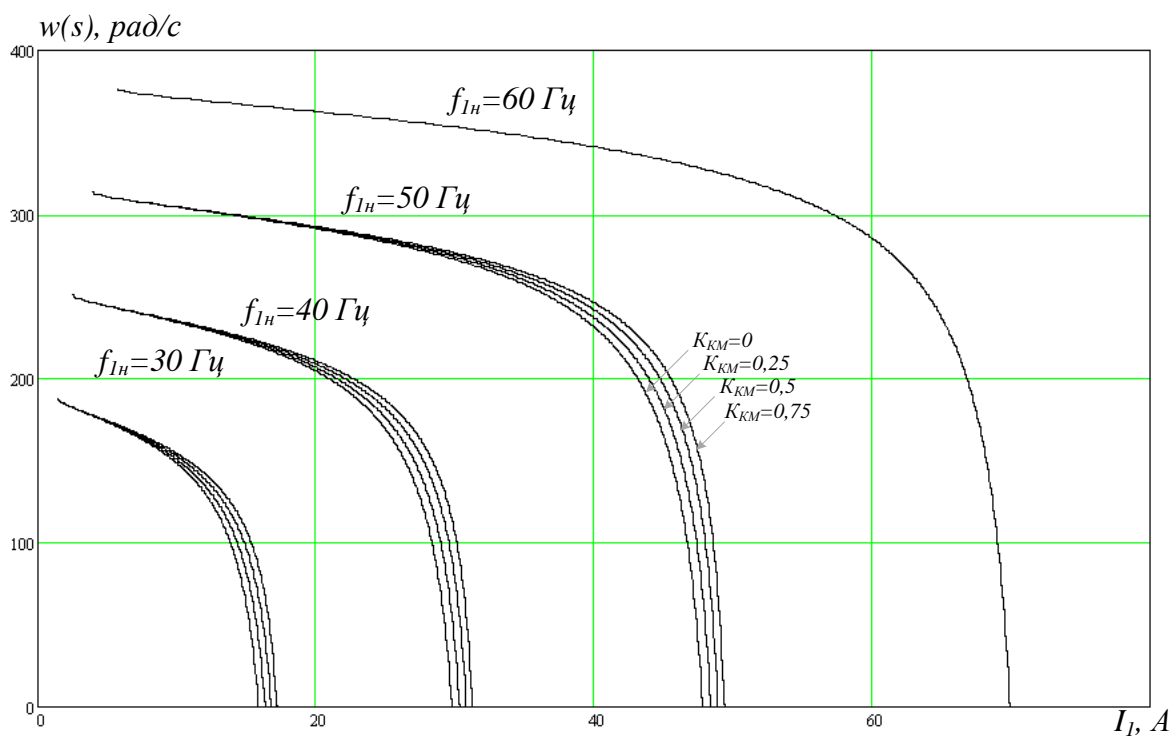


Рис. 7.5. Искусственные электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  при частотном регулировании скорости с  $IR$  – компенсацией.

Механические характеристики асинхронного двигателя  $M(\omega)$  (рис. 7.6) рассчитываем для выбранных коэффициентов  $K_{KM}$  по формулам:

$$M(s, f) = \frac{m_1 \cdot U_{1H}(f)^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}(f)^2 + \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right]}; \quad (7.37)$$

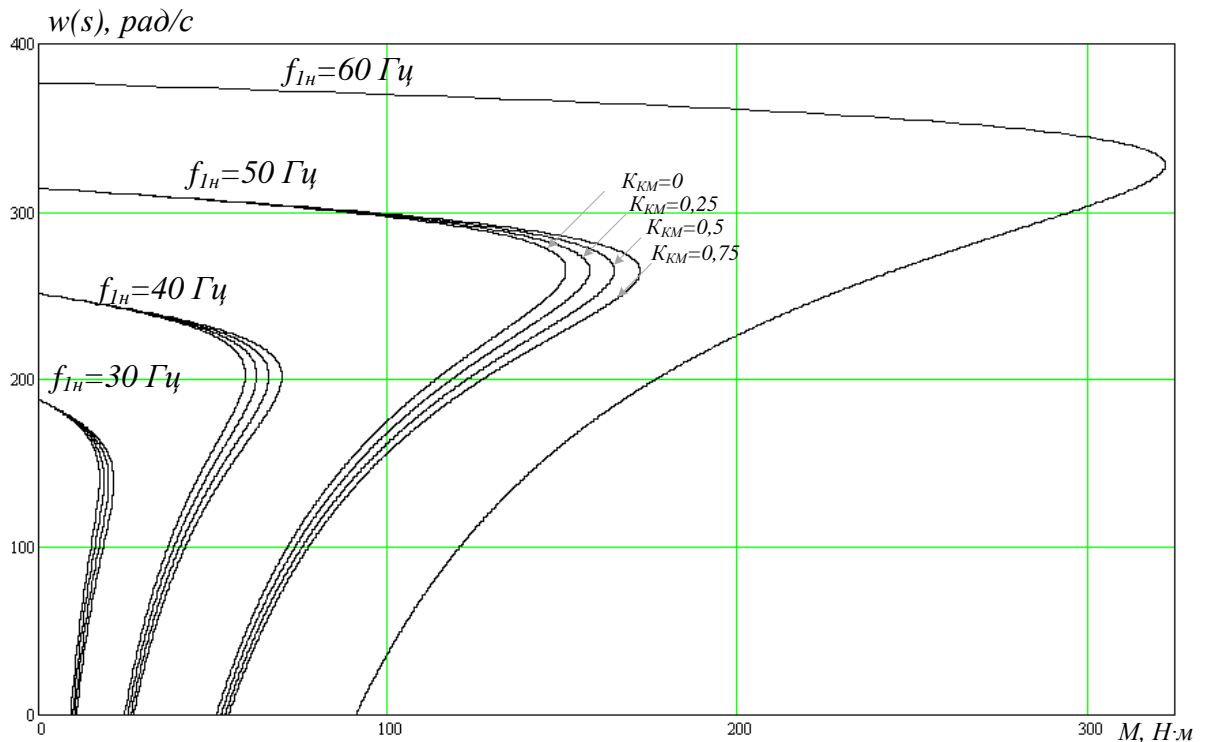


Рис. 7.6. Механические характеристики  $M(\omega)$  с  $IR$  – компенсацией.

По электромеханическим характеристикам рис. 7.4 и рис. 7.5 видим, что при росте коэффициента компенсации  $K_{KM}$  токи увеличиваются, это хорошо видно при уменьшении частоты питания обмоток статора  $f_1$ . Объясняется это тем, что на малых частотах больше напряжения падает на активном сопротивлении, чем на реактивном, значит тока выделяется для компенсации.

На механических характеристиках рис. 7.6 видим, что при росте компенсации момента  $K_{KM}$  растет и критический момент, а характеристики улучшаются. Но при пуске момент при компенсации почти не растет, это из-за того, что при запуске напряжение при компенсации увеличивается именно

на реактивном сопротивлении. Особенно это видно у мощных электродвигателей.

### 7.3. Расчет потерь в электроприводе с насосной нагрузкой при работе в заданном диапазоне скоростей

Определим потери в роторе при работе с насосной нагрузкой. Функции нагрузки и механические характеристики АД представлены на рис. 7.3. Так как графики пересекаются при  $f_{лн1}=60$  Гц при номинальной частоте и нагрузке, то частоты пересечения:

Значения скорости АД пересечения графиков:

$$\text{при } f_{лн1}=60 \text{ Гц} \quad \omega_{p1} = 359 \text{ рад/с}; \quad (7.38)$$

$$\text{при } f_{лн2}=50 \text{ Гц} \quad \omega_{p2} = 294 \text{ рад/с}; \quad (7.39)$$

$$\text{при } f_{лн3}=40 \text{ Гц} \quad \omega_{p3} = 225 \text{ рад/с}; \quad (7.40)$$

$$\text{при } f_{лн4}=30 \text{ Гц} \quad \omega_{p4} = 153 \text{ рад/с}; \quad (7.41)$$

Рассчитаем момент нагрузки и для каждой частоты вращения найдем скольжение.

Насосная нагрузка описывается формулой (7.29):

$$s_p = \frac{\omega_0 - \omega_p}{\omega_0}. \quad (7.42)$$

$$M_{н1} = 1,2 + 0,0000046 \cdot 358^3 = 212 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p1} = \frac{378 - 358}{378} = 0,053;$$

$$M_{н2} = 1,2 + 0,0000046 \cdot 293^3 = 117 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p1} = \frac{314 - 293}{314} = 0,067;$$

$$M_{н3} = 1,2 + 0,0000046 \cdot 224^3 = 53 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p1} = \frac{251 - 224}{251} = 0,108;$$

$$M_{н4} = 1,2 + 0,000008 \cdot 152^3 = 17 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p1} = \frac{188 - 152}{188} = 0,191;$$

Потери в роторе рассчитаем по выражению:

$$\Delta P_2 = \omega_0 \cdot s_p \cdot M_H. \quad (7.43)$$

$$\Delta P_2 = 378 \cdot 0,05 \cdot 322 = 6086 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_2 = 314 \cdot 0,067 \cdot 117 = 2461 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_2 = 251 \cdot 0,108 \cdot 53 = 1437 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_2 = 188 \cdot 0,191 \cdot 17 = 610 \text{ Вт}.$$

Как видим, потери в роторе уменьшаются с уменьшением частоты преобразователя. Объясняется тем, что момент нагрузки значительно уменьшается с уменьшением частоты.

## 8. Моделирование переходных процессов электропривода УЭЦН

### 8.1. Расчет переходных процессов скорости и момента для режима прямого пуска с насосом на валу двигателя

Моделирование асинхронного двигателя будем производить в программной среде MATLAB Simulink. [12] Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя представлена на рис. 8.1.

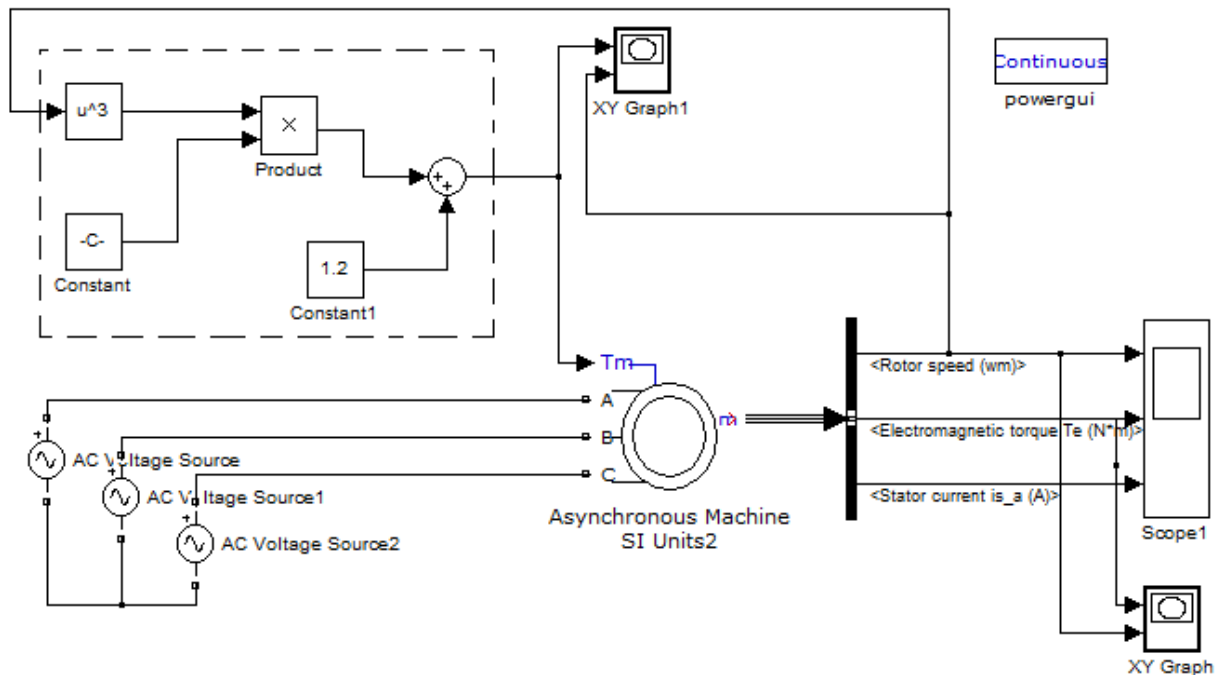


Рис. 8.1. Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя с насосной нагрузкой.

Для создания имитационной модели определим следующие параметры двигателя.

Сопротивление обмотки якоря:

$$R'_2 = 2,69 \text{ Ом.}$$

Обмотки статора:

$$R_1 = 3 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоками рассеяния:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{4,8}{2 \cdot 3,14 \cdot 60} = 0,013 \text{ Гн.} \quad (8.1)$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоками рассеяния:



$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_2}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{15,7}{2 \cdot 3,14 \cdot 60} = 0,042 \text{ Гн.} \quad (8.2)$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_m = \frac{X_0}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{242}{2 \cdot 3,14 \cdot 60} = 0,64 \text{ Гн.} \quad (8.3)$$

Выделенная пунктиром часть схемы моделирует нагрузку, характерную для насоса, которая изменяется пропорционально скорости АД в кубе, см. рис. 8.2.

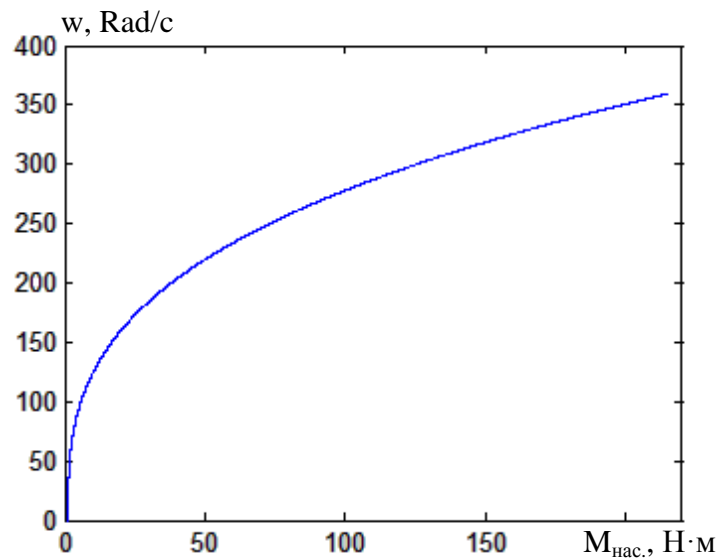


Рис. 8.2. Насосная нагрузка.

Как видим из осциллограммы рис. 8.2 начальный момент практически равен нулю, так как насосная нагрузка описывается выражением (7.29), и в начале разгона определяется трением подшипников двигателя и насоса:

$$M_{\text{нас.}} = 1,2 + 0,0000046 \cdot \omega^3,$$

где  $M_0$  – начальный момент, означающий трение подшипников,

$k$  – коэффициент пропорциональности между нагрузкой и частотой.

Если рассмотреть работу погружного насоса, то работать он начинает при условии равновесия давления жидкости на входе насоса и устье скважины, что мы и видим на рис. 8.2.

На рис. 8.4 представлены временные характеристики АД при прямом пуске с насосной нагрузкой: частоты вращения вала  $w(t)$ , момента  $M(t)$ , и тока статора  $I_1(t)$ . Динамическая механическая характеристика двигателя изображена на рис. 8.3.

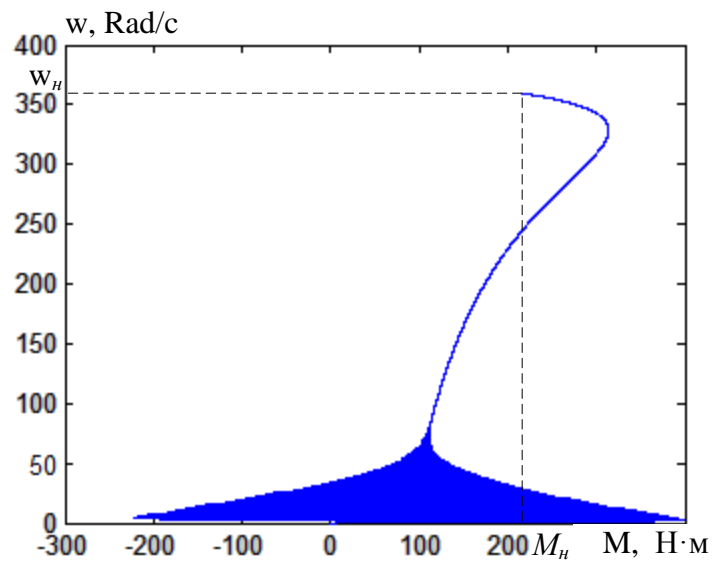


Рис. 8.3. Динамическая механическая характеристика.

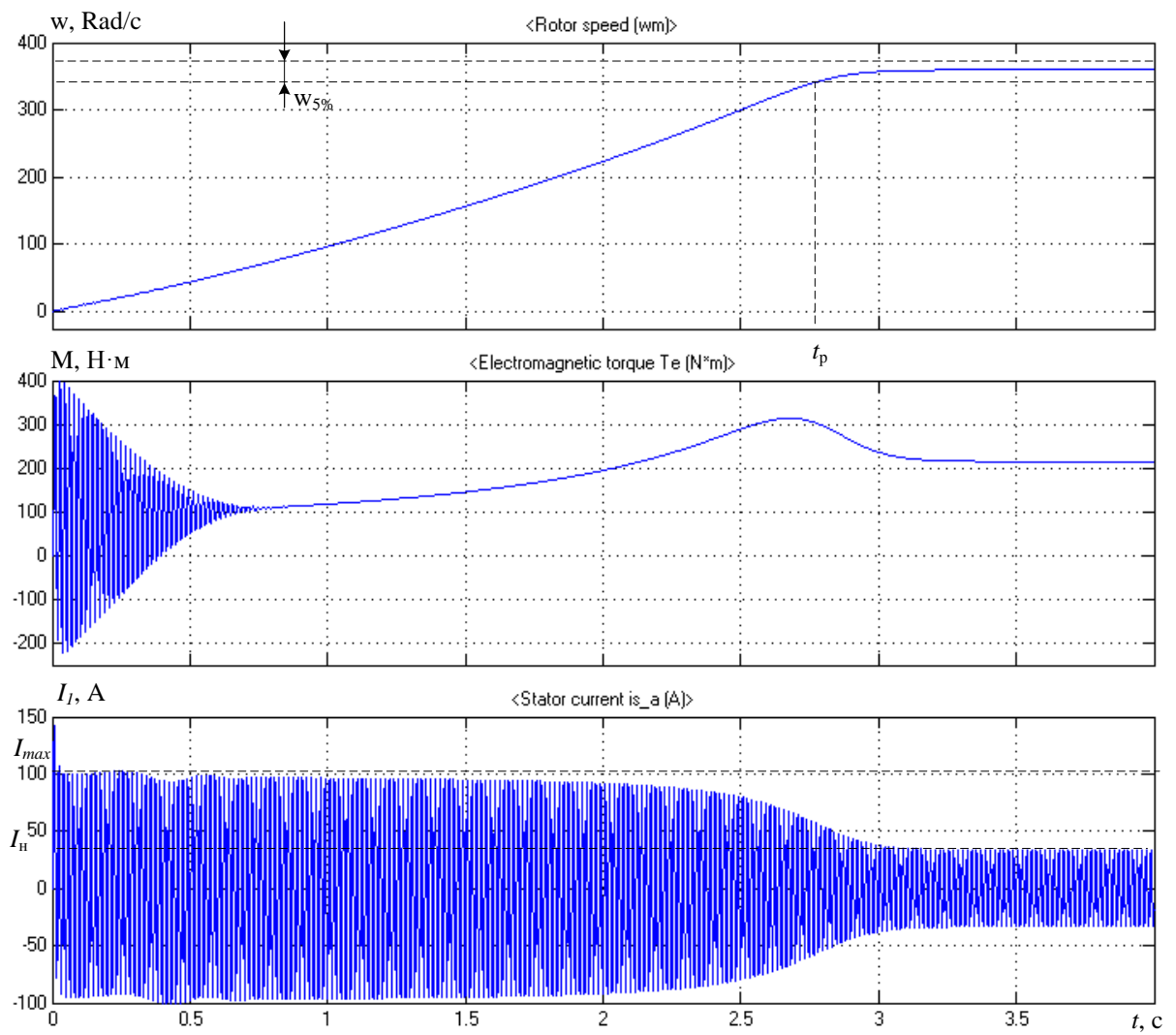


Рис. 8.4. Осциллограммы скорости двигателя  $w(t)$ , момента  $M(t)$ , и тока статора  $I_1(t)$  при пуске.

Время переходного процесса определим из условия достижения 5%-ой зоны от полного разгона электропривода, см. рис. 8.4.:

$$t_p = 2,8 \text{ с.}$$

Максимальный действующий ток:

$$I_{max} = \frac{100}{\sqrt{2}} = 71 \text{ А.}$$

Номинальный действующий ток:

$$I_n = \frac{36}{\sqrt{2}} = 25 \text{ А.}$$

Момент электромагнитный:

$$M_n = 210 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Установившаяся частота:

$$\omega_n = 355 \text{ Rad/c.}$$

Как видим из графиков на рис. 8.4. двигатель разгоняется плавно с нуля до номинальной скорости. Пусковой момент двигателя меньше номинального и при разгоне достигает критического и только потом снижается до номинального (при активной нагрузке  $M_{нас}$  больше пускового момента запуск двигателя был бы не возможен). Также при прямом пуске ток превышает номинальный примерно в 3 раза, время разгона больше 2,5 секунд, что может привести к выходу из строя двигателя. Поэтому нефтяные погружные двигатели ЭЦН запускают с помощью частотных преобразователей или устройств плавного пуска, которые позволяют снизить пусковые токи.

## 8.2. Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска с нагрузкой в виде насоса на валу двигателя системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Составим имитационную модель привода с частотным преобразователем и ИР коррекцией, см. рис. 8.5.

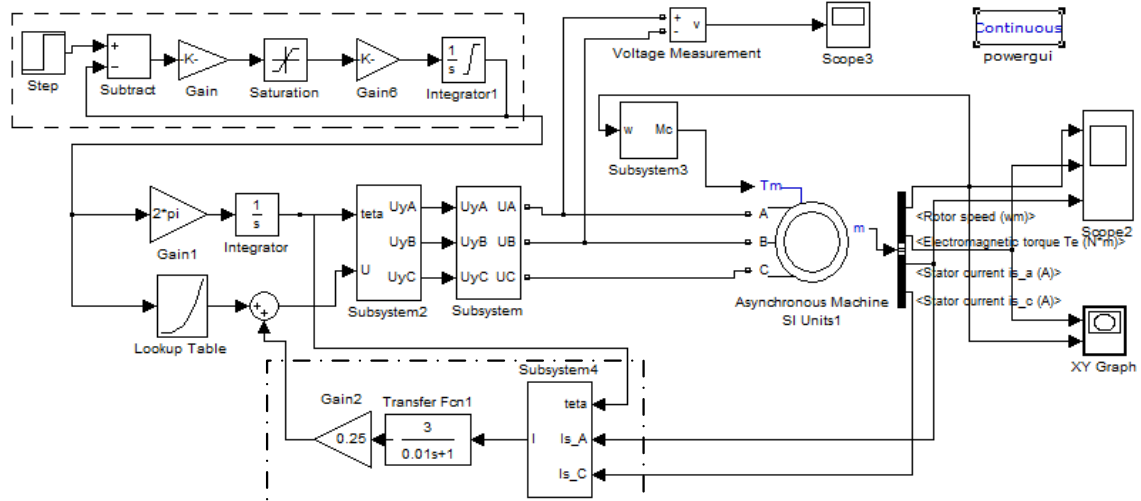


Рис. 8.5. Модель системы скалярного частотного управления с ИР-компенсацией

Рассмотрим передаточные функции входящих в нее блоков.

Напряжение и частота в схеме изменяются по закону –  $U_{1н}/f_{1н}^3 = const.$ , см. рис. 8.6., Который формирует нужный уровень напряжения в зависимости от требуемой частоты напряжения преобразователя в блоке «преобразователь частота – напряжение» (ПЧН), на рис. 8.5 – блок «Lookup Table».

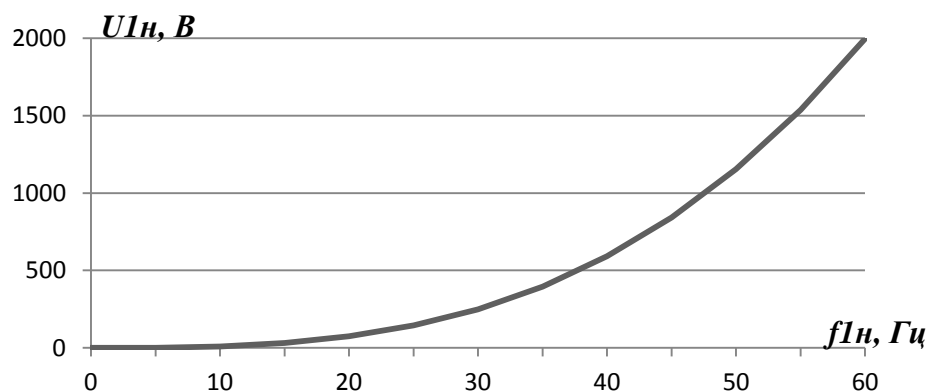


Рис. 8.6. Зависимость  $U_{1н}(f_{1н})$ .

Инвертор напряжения (блок – «Subsystem») представлен апериодическим звеном:

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин}}{T_{ин}p + 1} = \frac{1}{0,00001p + 1}, \quad (8.4)$$

где  $k_{ин}$  – коэффициент передачи инвертора;

$T_{ин} = \frac{1}{f_{нч}} = \frac{1}{100000} = 0,00001 \text{ с}$  – постоянная времени запаздывания автономного инвертора напряжения,  $f_{нч} = 100000 \text{ Гц}$  – несущая частота инвертора.

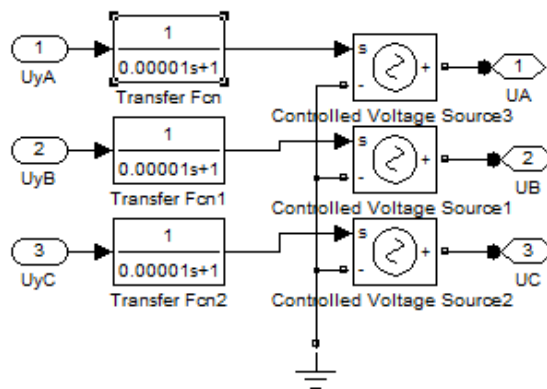


Рис. 8.7. Модель преобразователя частоты

Блок – «Subsystem2» - модель прямого координатного преобразователя (ПКП), на выходе которого формируется три синусоидальных напряжения управления  $U_{y1A}$ ,  $U_{y1B}$ ,  $U_{y1C}$ , сдвинутые относительно друг друга на угол  $\pm 2\pi/3$ , с амплитудами, пропорциональными напряжению управления. Сигналы  $U_{y1A}$ ,  $U_{y1B}$ ,  $U_{y1C}$  формируют фазные напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН).

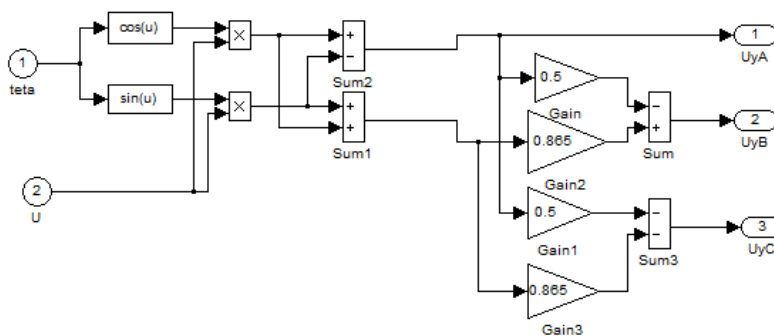


Рис. 8.8. Модель прямого координатного преобразователя

Блок – «Subsystem3» - имитирует нагрузку центробежного насоса , см. рис. 8.1.

Выделенная пунктиром часть модели на рис.5 имитирует задатчик интенсивности роста напряжения, который формирует кривую и темп разгона двигателя.

При малых частотах напряжение на активной части сопротивления статора остается неизменным, в то время как падение напряжения на реактивной части уменьшается, в результате чего сила магнитного поля будет уменьшаться. Для того, чтобы компенсировать эту потерю напряжения на низкой скорости, необходимо обеспечить ПЧ дополнительным напряжением, поэтому применяется IR-компенсация. Обратная положительная связь по току осуществляется через формирователь тока статора (ФТС) (блок – «Subsystem4»), звено с передаточной функцией (Transfer Fcn1) и усилитель (Gain2) (см. рис. 8.5, выделено штрих-пунктирным контуром):

$$W(p) = k_{\text{км}} \cdot \frac{R_1}{1 + T_{\text{км}} \cdot p} = k_{\text{км}} \cdot \frac{3}{1 + 0,01p}, \quad (8.5)$$

где  $T_{\text{км}}$  – постоянная времени задержки контура тока.

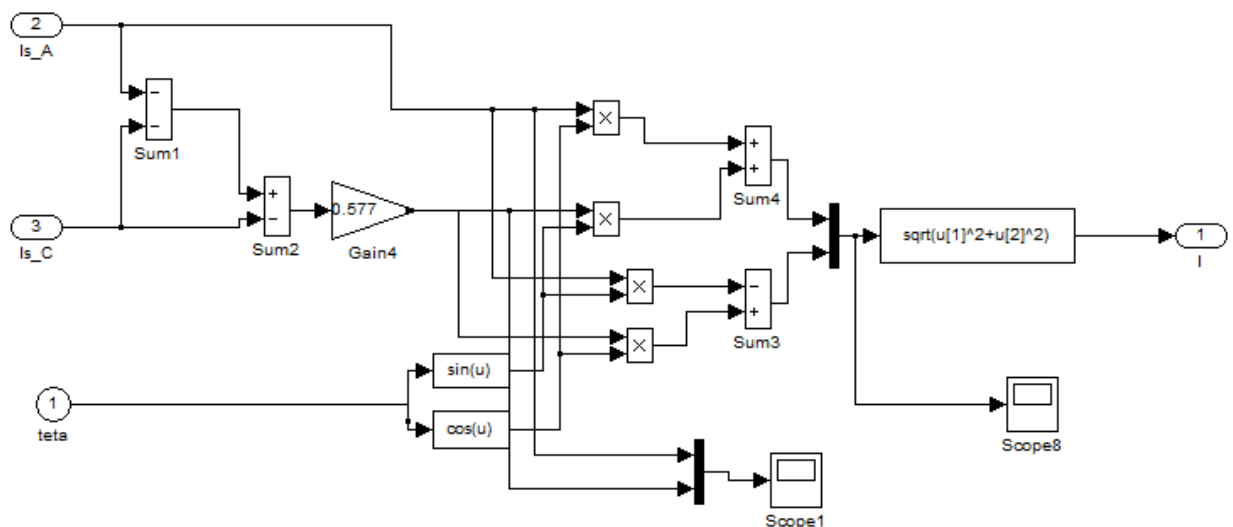


Рис. 8.9. Модель формирователя тока статора.

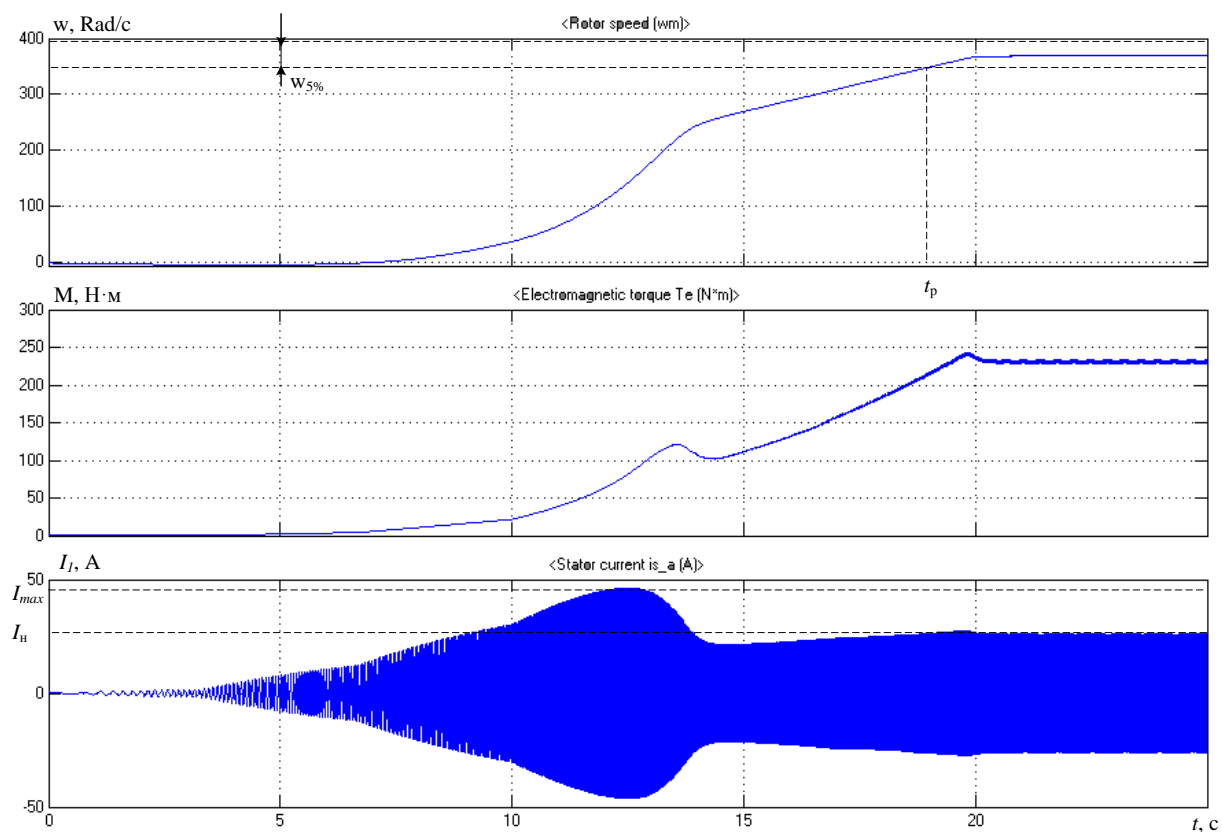


Рис. 8.10. Переходные характеристики  
системы «ПЧ-АД» без IR коррекции,  $f_{1H} = 60$  Гц.

$$t_p = 18 \text{ с}; \quad I_{max} = 45 \text{ А}; \quad I_H = 25 \text{ А}.$$

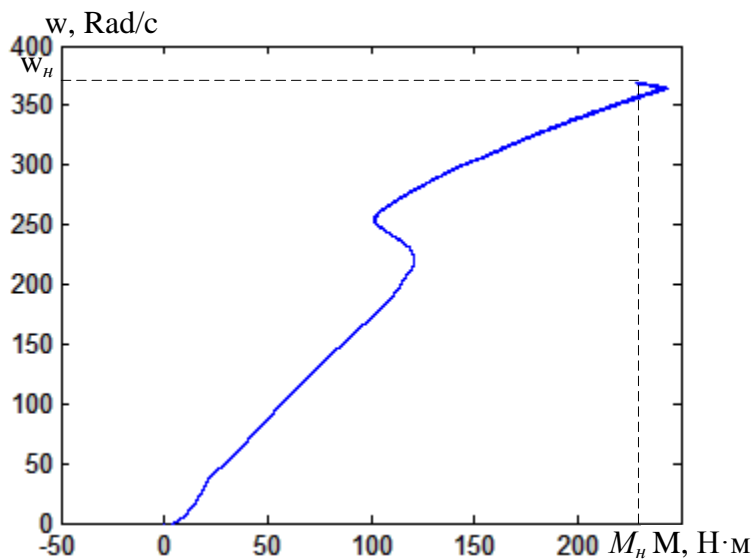


Рис. 8.11. Динамическая механическая характеристика  
системы «ПЧ-АД» без IR коррекции,  $f_{1H} = 60$  Гц.

$$M_H = 210 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad w_H = 355 \text{ Rad/c}.$$

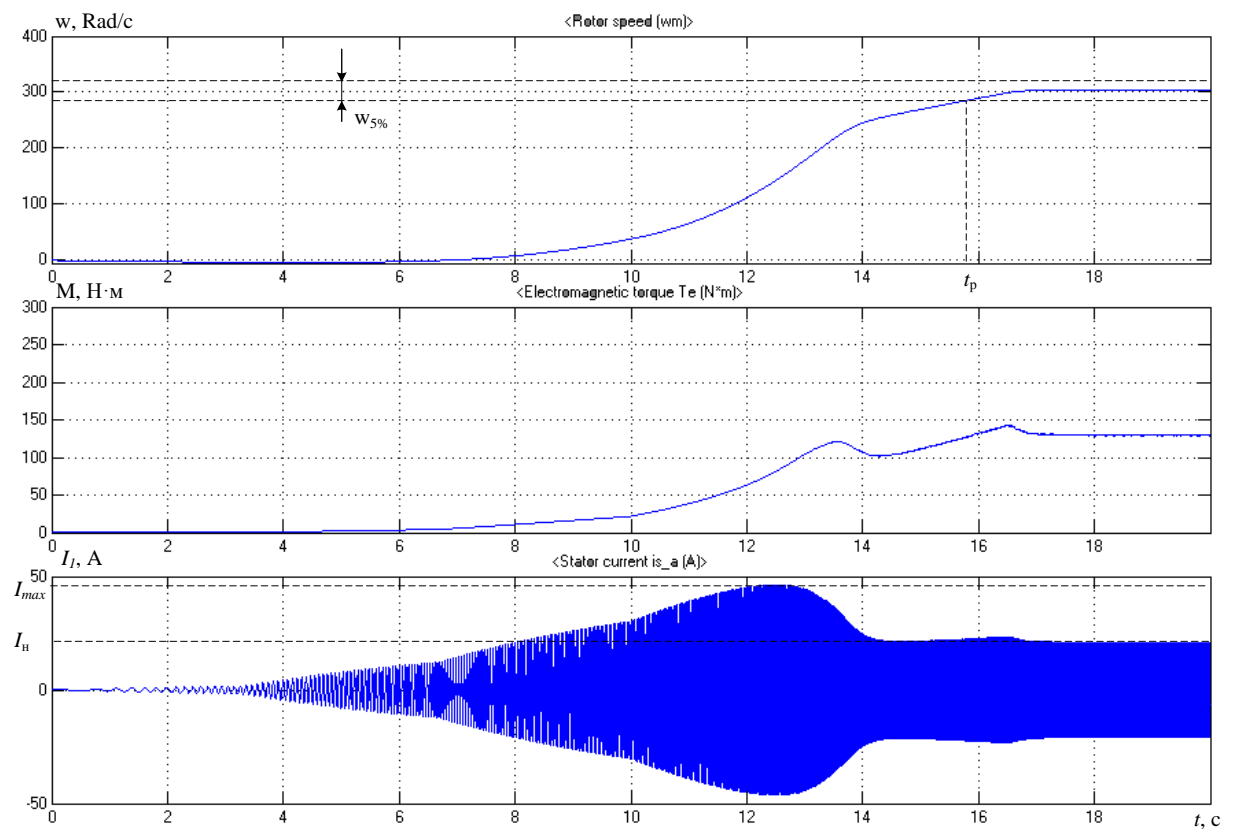


Рис. 8.12. Переходные характеристики  
системы «ПЧ-АД» без ИР коррекции,  $f_{1H} = 50$  Гц.  
 $t_p = 15,7$  с;  $I_{max} = 45$  А;  $I_H = 22$  А.

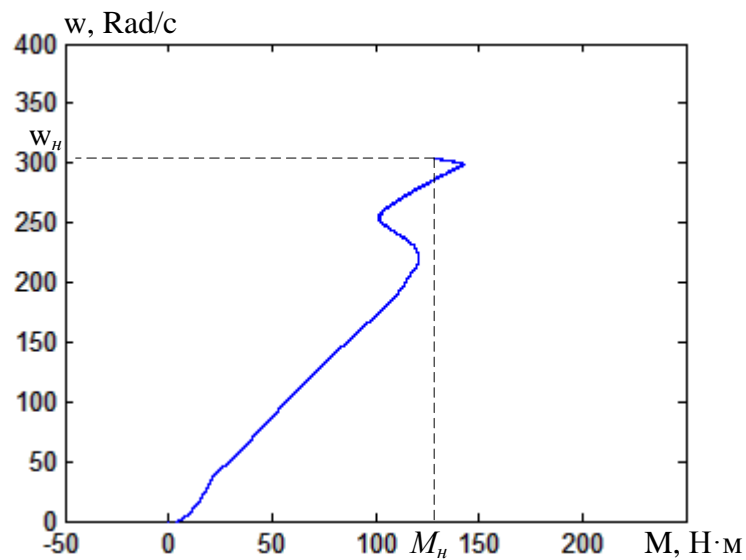


Рис. 8.13. Динамическая механическая характеристика  
системы «ПЧ-АД» без ИР коррекции,  $f_{1H} = 50$  Гц.  
 $M_H = 130$  Н·м.  $w_H = 300$  Rad/c.



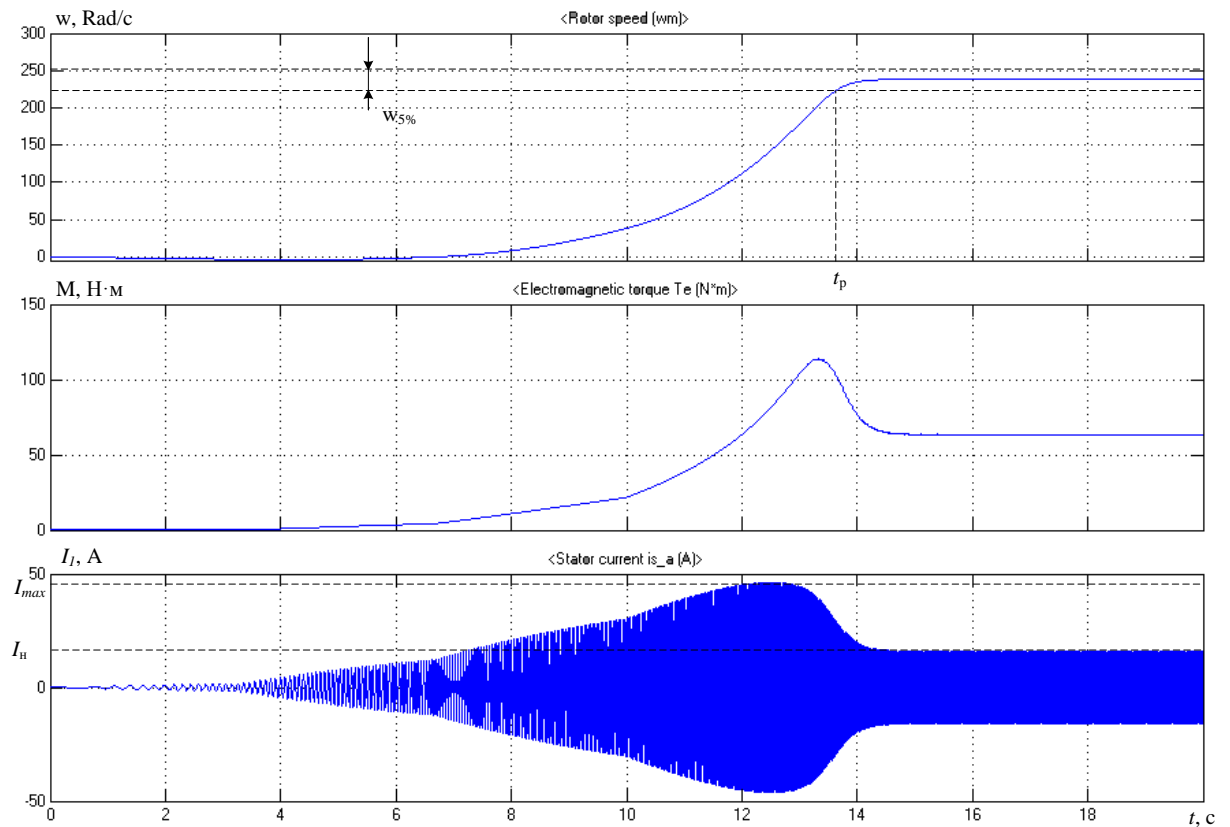


Рис. 8.14. Переходные характеристики системы «ПЧ-АД» без ИР коррекции,  $f_{1H} = 40$  Гц.

$$t_p = 13,5 \text{ с}; \quad I_{max} = 45 \text{ А}; \quad I_H = 20 \text{ А}.$$

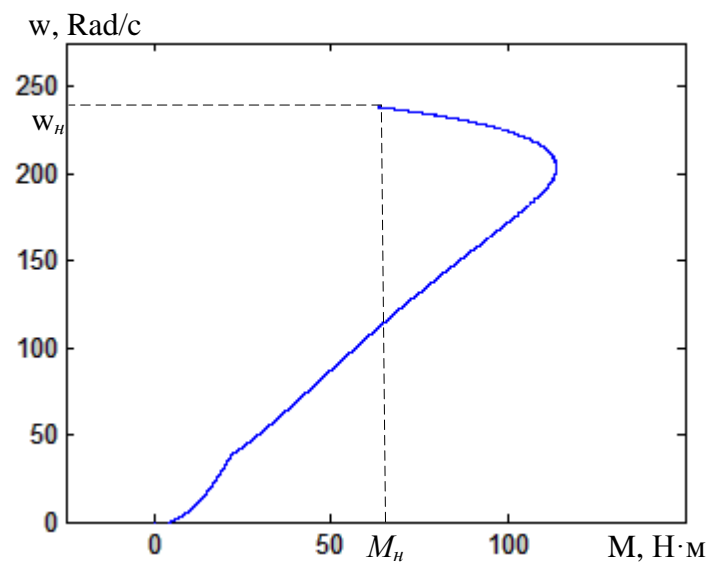


Рис. 8.15. Динамическая механическая характеристика системы «ПЧ-АД» без ИР коррекции,  $f_{1H} = 40$  Гц.

$$M_H = 65 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad w_H = 230 \text{ Rad/c}.$$

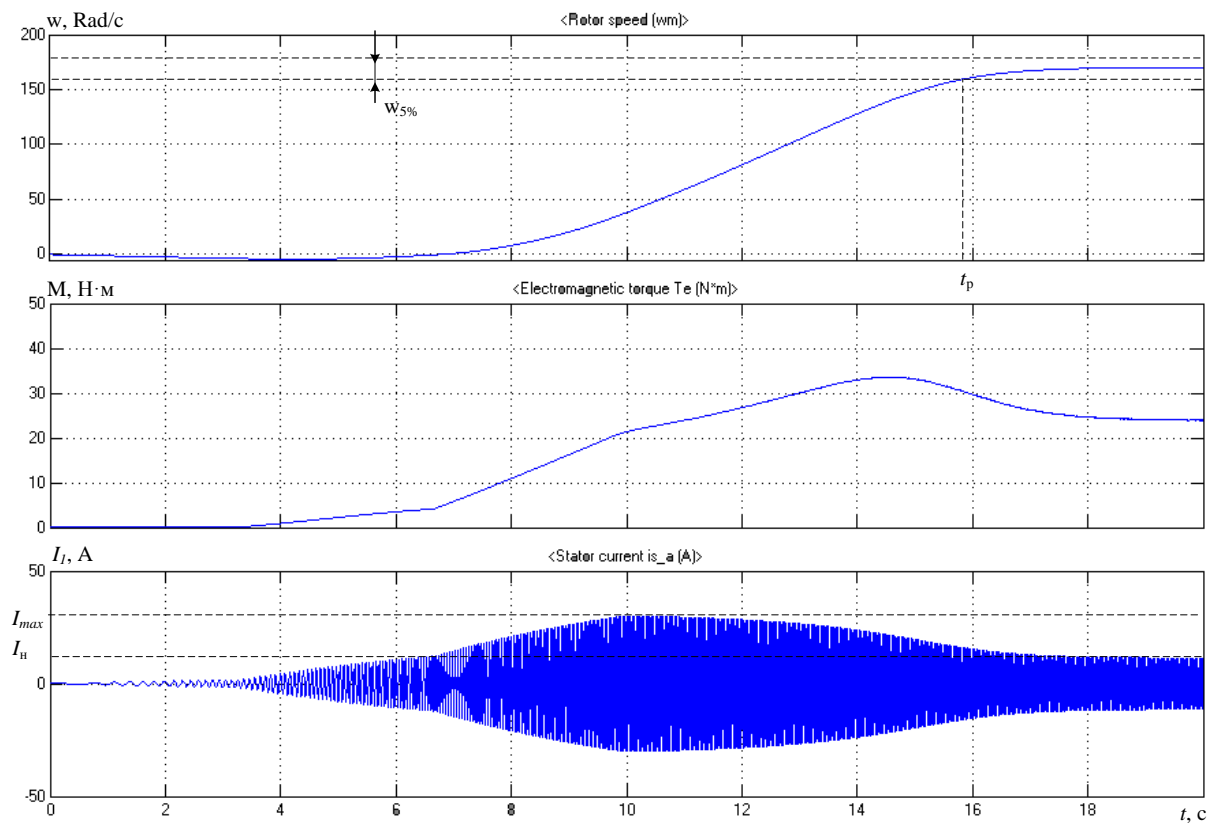


Рис. 8.16. Переходные характеристики  
системы «ПЧ-АД» без IR коррекции,  $f_{1H} = 30$  Гц.  
 $t_p = 15,8$  с;  $I_{max} = 35$  А;  $I_H = 10$  А.

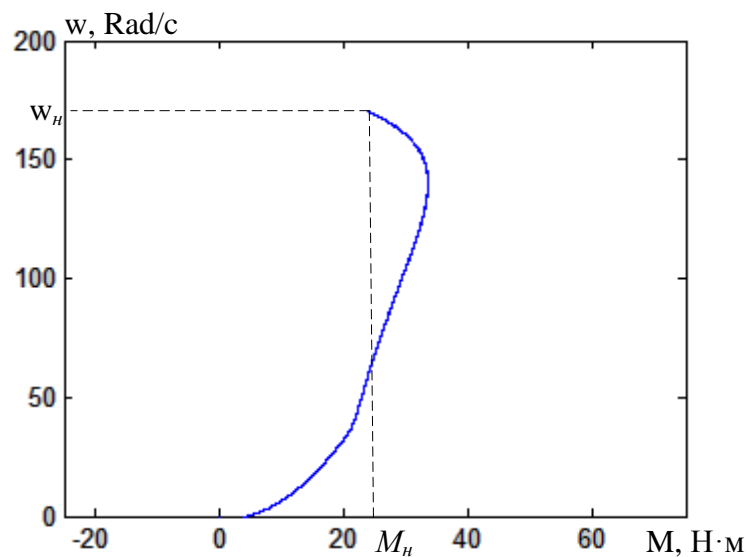


Рис. 8.17. Динамическая механическая характеристика  
системы «ПЧ-АД» без IR коррекции,  $f_{1H} = 30$  Гц.  
 $M_H = 25$  Н · м.  $\omega_H = 170$  Rad/c.

При использовании частотного преобразователя при определённой скорости (коэффициент задержки 0,05) разгона двигателя получаем четкие характеристики скорости и момента двигателя рис. 8.10 – рис. 8.17. Из осциллограмм на рис. 8.11,13,15 и рис. 8.17 видим, что пусковой ток плавно возрастает со скоростью двигателя и незначительно превышает номинальный. Время разгона увеличилось при  $f_{1н} = 60$  Гц с 2,8 с. до 18 с. При большем увеличении времени разгона (уменьшении коэффициент задержки) пусковой ток не будет превышать номинальный. Также видим, что при уменьшении частоты напряжения (50 и 40 Гц) время разгона уменьшается (15,7 с. и 13,5 с.). Связано это с тем, что подъем частоты происходит линейно в зависимости от времени. Но при  $f_{1н} = 30$  Гц время разгона увеличивается до 15,8 с, так как напряжение питания растёт медленнее и при данной частоте магнитный поток недостаточно сильный, чтобы быстро разогнать двигатель до нужной скорости. Можно сделать вывод, что запуск электропривода в работу стоит производить на частоте примерно  $f_{1н} = 40$  Гц, а затем разгонять до нужной скорости.

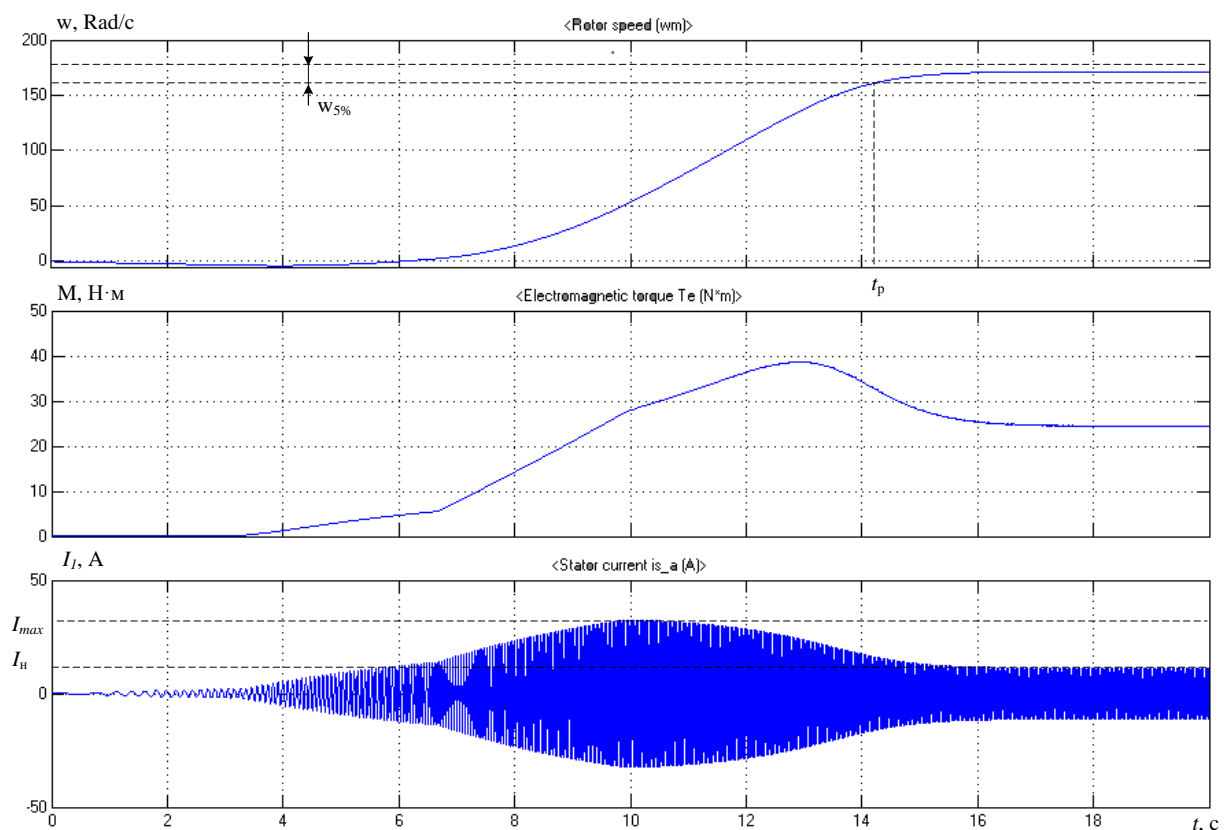


Рис. 8.18. Переходные характеристики

системы «ПЧ-АД» с ИР коррекцией,  $f_{1н} = 30$  Гц,  $K_{КМ} = 0,25$ .

$$t_p = 14,2 \text{ с}; \quad I_{max} = 35 \text{ А}; \quad I_H = 10 \text{ А}.$$

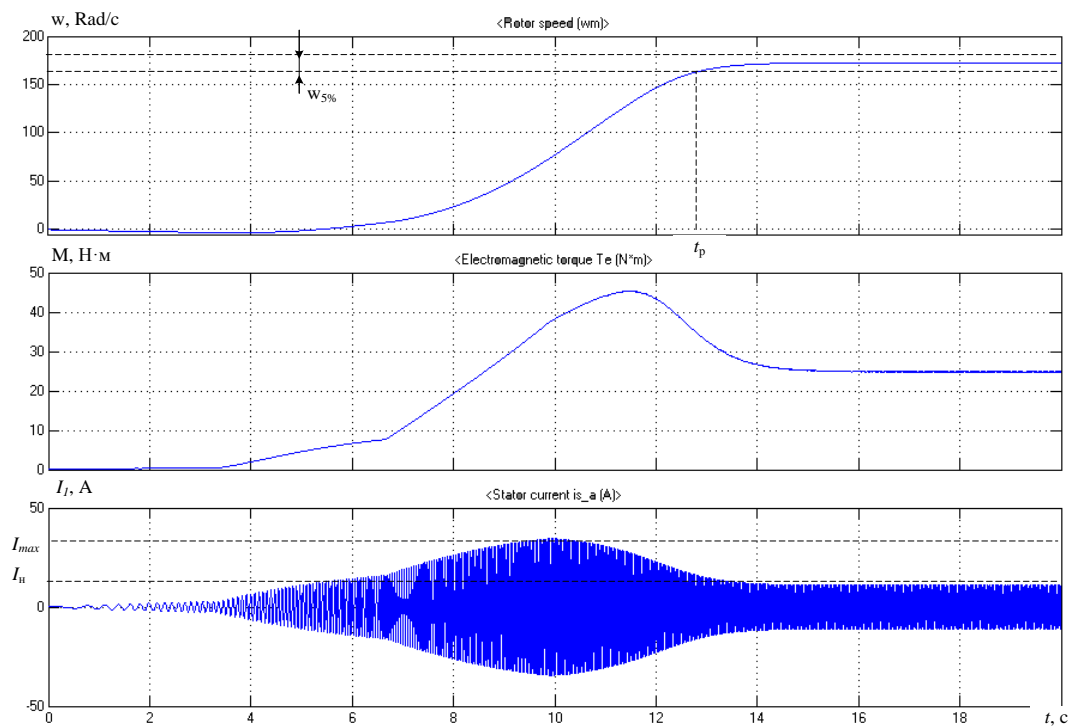


Рис. 8.19. Переходные характеристики  
системы «ПЧ-АД» с IR коррекцией,  $f_{1H} = 30$  Гц,  $K_{KM} = 0,5$ .  
 $t_p = 12,9$  с;  $I_{max} = 35$  А;  $I_H = 10$  А.

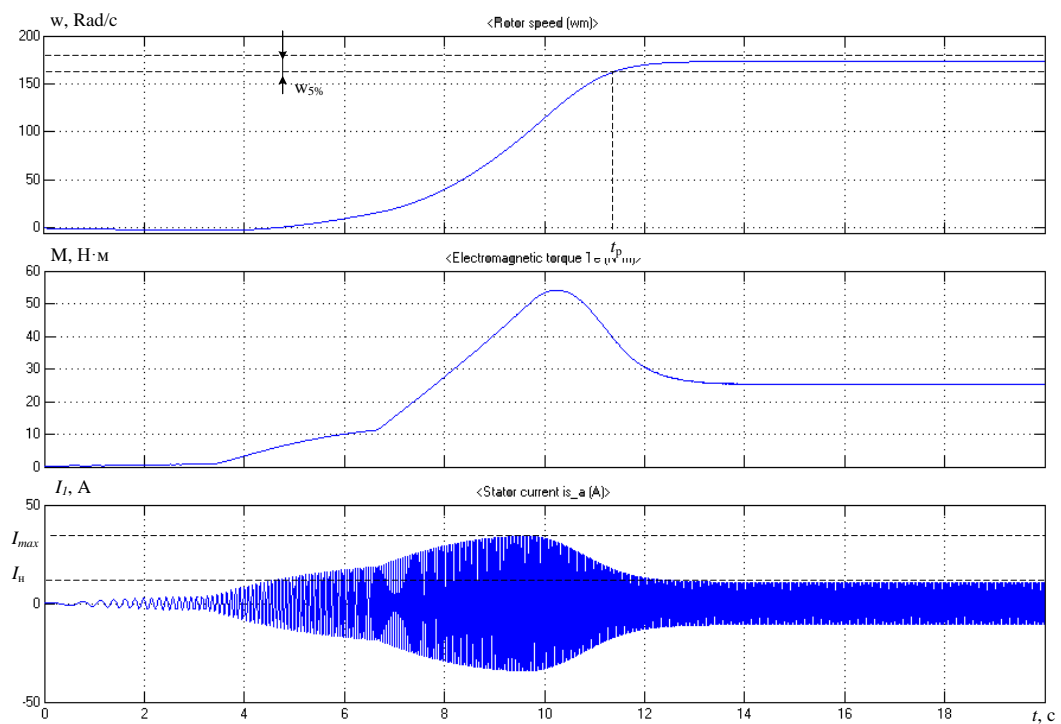


Рис. 8.20. Переходные характеристики  
системы «ПЧ-АД» с IR коррекцией,  $f_{1H} = 30$  Гц,  $K_{KM} = 0,75$ .  
 $t_p = 11,3$  с;  $I_{max} = 35$  А;  $I_H = 10$  А.

При введении IR коррекции в систему при  $f_{1н} = 30$  на рис. 8.18 – рис. 8.20 видим, что характеристики разгона улучшились.

Двигатель начинает разгоняться тем быстрее, чем больше коэффициент компенсации -  $t_p = 15,8$  с. без коррекции и  $t_p = 11,3$  с при  $K_{KM} = 0,75$ .

Объясняется это тем, что при IR-коррекции частично компенсируется падение напряжения на активном сопротивлении статора подачей дополнительного управляющего напряжения на вход частотного преобразователя за счет положительной обратной связи по току. То есть к напряжению, формируемому задатчиком интенсивности, добавляется напряжение за счет обратной положительной связи по току, и в итоге на статоре при той же частоте питания формируется большее напряжение и следовательно магнитный поток тоже больше.

## **9. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Существует много видов электроприводов с асинхронным электродвигателем, прямого пуска, плавного, с частотным регулированием или электродвигатели специального исполнения – вентильные. В этом проекте рассчитан ЭП с частотным регулированием для использования в нефтяной скважине. Размеры и мощность в данном случае усложняют изготовление подобных приводов.

Нефтяная отрасль является достаточной малозаполненной нишей, поскольку ЭП с системой «ПЧ-АД» и плавным пуском для данной отрасли производят узкоспециализированные фирмы, ориентированные на производство специфической продукции. В силу специфичности этой продукции эти фирмы малочисленны.

Продукция других фирм более универсальна и ее можно использовать в различных смежных отраслях промышленности.

### **9.1. SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Он проводится в несколько этапов. [13]

**Первый этап** заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Определим *сильные стороны* – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. То есть рассмотрим преимущества, которые дает использование электропривода погружного ЭЦН с системой «ПЧ-АД» перед насосами и ЭП других исполнений.

Таблица 9.1.

## Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны проекта:</b>	<b>Слабые стороны проекта:</b>
	<p>С1. Большая эффективность при меньших затратах потребляемой электрической энергии</p> <p>С2. Замена старого электрооборудования современным</p> <p>С3. Непрерывный контроль параметров работы установки в режиме реального времени</p> <p>С4. Изменение режима работы без останова в процессе эксплуатации</p> <p>С5. Использование электронных систем защит и аварийной сигнализации</p> <p>С6. Высокая точность параметров установки</p> <p>С7. Технологичность оборудования при монтаже и ремонте</p> <p>С8. Простота и удобство в обслуживании</p>	<p>Сл1. Высокая стоимость преобразователя частоты и электродвигателя ЭЦН</p> <p>Сл2. Потребность в специальных материалах и сплавах для решения технологических проблем.</p> <p>Сл3. Специальная подготовка обслуживающего персонала</p> <p>Сл4. Монтаж и ремонт специализированными организациями</p> <p>Сл5. Узкая ниша применения данного оборудования</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Высокий уровень автоматизации процесса (за счет векторного управления)</p> <p>В2. Увеличение ресурса электрооборудования за счет выбора оптимального режима работы</p> <p>В3. Ремонтопригодность за счет блочного исполнения</p> <p>В4. Снижение потерь электроэнергии</p> <p>В5. Использование инновационных технологий</p>	<p>В1С1С2С3С4С5С6С8</p> <p>В2С1С2С3С4С5С6С8</p> <p>В3С2С7С8</p> <p>В4С1С2С3С4С5С6</p> <p>В5С1С2С3С5С6С8</p>	<p>В1Сл1</p> <p>В2Сл1Сл2</p> <p>В3Сл1Сл2Сл4</p> <p>В4 Сл1</p> <p>В5Сл1Сл2Сл4</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. Оборудование подвержено влиянию окружающей среды</p> <p>У2. Ошибочные действия персонала</p> <p>У3. Чувствительны к качеству электроснабжения</p> <p>У4. Требование новых функциональных возможностей</p> <p>У5. Появления новых технических условий и требований к электрооборудованию</p>	<p>У1С2С5С6</p> <p>У2С3С4С5С8</p> <p>У3С4С5С6</p> <p>У4С2С5С7С8</p> <p>У5С2С3С5С6С7</p>	<p>У1Сл2</p> <p>У2Сл3Сл4</p> <p>У4Сл1Сл2Сл4Сл5</p> <p>У5Сл1Сл2Сл3Сл4Сл5</p>

Таблица 9.2.

### Интерактивная матрица сильных сторон

Сильные стороны проекта									
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	B1	+	+	+	+	+	+	0	+
	B2	+	+	+	+	+	+	0	+
	B3	-	+	-	0	0	-	+	+
	B4	+	+	+	+	+	+	-	-
	B5	+	+	+	0	+	+	0	+
Угрозы	У1	-	+	0	-	+	+	-	-
	У2	-	0	+	+	+	-	-	+
	У3	-	-	-	+	+	+	-	-
	У4	-	+	-	0	+	-	+	+
	У5	-	+	+	-	+	+	+	-

Таблица 9.3.

### Интерактивная матрица слабых сторон

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	+	-	0	-	-
	B2	+	+	-	-	-
	B3	+	+	-	+	-
	B4	+	-	-	-	-
	B5	+	+	-	+	-
Угрозы	У1	-	+	-	-	-
	У2	-	-	+	+	-
	У3	-	0	-	-	-
	У4	+	+	-	+	+
	У5	+	+	+	+	+

Выделим *слабости* разрабатываемого проекта – это недостатки, упущения или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что является недостатком рассматриваемого электрооборудования в силу его специфичности.

Рассмотрим дополнительные *возможности* использования в будущем



электропривода с частотным регулятором и *угрозы*, представляемые собой любые нежелательные ситуации, тенденции или изменения в условиях разработки, эксплуатации и ремонта электропривода с ПЧ.

Результаты первого этапа SWOT-анализа представим в табл.9.1.

На **втором этапе** выявим соответствия сильных и слабых сторон рассматриваемого электропривода внешним условиям окружающей среды.

Построим интерактивные матрицы табл. 9.2 и табл. 9.3 проекта. Ее использование поможет разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор будет помечаться либо знаком «+» (сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

На **третьем этапе** на основании интерактивных матриц сильных и слабых сторон проекта составим итоговую матрицу SWOT-анализа, заполнив табл. 9.1.

Как видим из табл. 9.1, не смотря на достаточное количество недостатков, преимуществ больше, так как цепочки соответствия сильных сторон и возможностей длиннее.

## **9.2. Разработка графика проведения работ технического проекта**

Для выполнения расчетов электропривода УЭЦН с ЧП сформируем группу, в состав которой войдут:

1. Руководитель;
2. Проектировщик.

Составим перечень этапов реализации проекта, и распределим исполнителей по видам работ.

1. Согласование технического задания (ТЗ) с руководителем, в котором выбирается тип электропривода, условия выбора мощности двигателя и особенности эксплуатации электропривода.

2. Ознакомление с аналогичными проектами ЭП, технологией эксплуатации с помощью учебной, справочной литературы и интернет

ресурсов, сбор общих данных для начала проекта.

3. Расчет мощности и выбор электродвигателя из условий работы ЭЦН.

4. Выбор и описание системы управления ЭП.

5. Выбор защиты и кабельных линий.

6. Расчет естественных и искусственных характеристик АД в среде MATHCAD.

7. Моделирование переходных процессов скорости и момента электропривода с системой «ПЧ-АД» в среде MATLAB Simulink

8. Разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

9. Разработка раздела «Социальная ответственность».

10. Оформление пояснительной записки.

11. Отправка работы руководителю и размещение в электронно-библиотечной системе (ЭБС) ТПУ, подготовка к защите и защита проекта.

График инженерных работ составим в виде диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками.

Продолжительность выполнения работ определим, исходя из трудоемкости выполнения этих работ.

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости  $t_{ож}$ :

$$t_{ожi} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5},$$

где  $t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{min_i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Определим продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ .

$$T_{p i} = \frac{t_{ож i}}{Ч_i},$$

где  $T_{p i}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Пример расчета для 2 этапа работы:

$$t_{ож 2} = \frac{3 \cdot 12 + 2 \cdot 14}{5} = 12,8 \text{ чел. – дн.};$$

$$T_{p 2} = \frac{12,8}{1} = 12,8 \approx 13 \text{ раб. дн.}$$

Результаты расчетов сведем в табл. 9.4.

Из диаграммы Ганта видно, что продолжительность работ составляет примерно 8 декад, начиная с середины марта и заканчивая началом первой декады июня, участие каждого специалиста рабочей группы: руководитель – 8 дней, проектировщик – 72 дня.

Таблица 9.4.

## Временные показатели проведения технического проектирования, чел.-дн.

№ этапа работы	Вид работ	Исполнители	Минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i-ой работы, $t_{\min}$ , чел.-дн.	Максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i-ой работы, $t_{\max}$ , чел.-дн.	Ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, $t_{\text{ож}}$ , чел.-дн.	Продолжительность одной работы, $T_p$ , раб.дн.
1	Согласование технического задания (ТЗ) с руководителем.	Проектировщик	1	1	1,0	1
		Руководитель	1	1	1,0	1
2	Ознакомление с учебной, справочной литературы и интернет ресурсов, сбор общих данных.	Проектировщик	12	14	12,8	13
3	Расчет мощности и выбор электродвигателя из условий работы ЭЦН.	Проектировщик	5	7	5,8	6
		Руководитель	1	1	1,0	1
4	Выбор и описание системы управления ЭП.	Проектировщик	4	6	4,8	5
		Руководитель	1	1	1,0	1
5	Выбор защиты и кабельных линий.	Проектировщик	5	7	5,8	6
6	Расчет естественных и искусственных характеристик АД в среде MATHCAD.	Проектировщик	8	12	9,6	10
		Руководитель	1	1	1,0	1
7	Моделирование переходных процессов скорости и момента электропривода с системой «ПЧ-АД» в среде MATLAB Simulink	Проектировщик	6	8	6,8	7
		Руководитель	1	1	1,0	1
8	Разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».	Проектировщик	5	7	5,8	6
		Руководитель	1	1	1,0	1
9	Разработка раздела «Социальная ответственность».	Проектировщик	5	7	5,8	6
		Руководитель	1	1	1,0	1
10	Оформление пояснительной записки.	Проектировщик	12	14	12,8	13
11	Отправка работы руководителю и размещение в электронно-библиотечной системе (ЭБС) ТПУ, подготовка к защите и защита проекта.	Проектировщик	1	1	1,0	1
		Руководитель	1	1	1,0	1

Таблица 9.5.

## Диаграмма Ганта

№ этапа работ	Вид работ	Исполнители*	Продолжительность одной работы дн.	Продолжительность выполнения работ по декадам										
				Март			Апрель			Май			Июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Согласование технического задания (ТЗ) с руководителем.	П	1		■									
		Р	1		■									
2	Ознакомление с учебной, справочной литературы и интернет ресурсов, сбор общих данных.	П	13		■	■								
3	Расчет мощности и выбор электродвигателя из условий работы ЭЦН.	П	6				■	■						
		Р	1					■						
4	Выбор и описание системы управления ЭП.	П	5					■						
		Р	1						■					
5	Выбор защиты и кабельных линий.	П	6					■	■					
6	Расчет естественных и искусственных характеристик АД в среде MATHCAD.	П	10					■	■					
		Р	1							■				
7	Моделирование переходных процессов скорости и момента электропривода с системой «ПЧ-АД» в среде MATLAB Simulink	П	7							■	■			
		Р	1								■			
8	Разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».	П	6							■	■			
		Р	1								■			
9	Разработка раздела «Социальная ответственность».	П	6								■	■		
		Р	1									■		
10	Оформление пояснительной записки.	П	13								■	■	■	
11	Защита	Р	1											■
		П	1											■

\* «П» – Проектировщик, «Р» – руководитель

### 9.3. Бюджет разработки электропривода

При планировании сметы ЭП определим расходы, связанные с проектированием, и затраты на реализацию проекта.

Для составления затрат на проектирование учитываются следующие расходы:

- з/п руководителя и проектировщика,
- отчисления на социальные нужды,
- накладные расходы.

Затраты на реализацию проекта включают в себя

- Стоимость оборудования и комплектующих;
- Стоимость материалов для монтажа и установки
- Стоимость монтажа

#### 9.3.1. Затраты на проектирование

##### Расчет з/п руководителя и проектировщика

Произведем расчет заработной платы, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата;

$З_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $З_{осн}$ ),

$$З_{осн} = З_{дн} T_p,$$

$З_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

$$З_{дн} = \frac{З_{ТС} + З_{допл} + З_{р.к.}}{F_d},$$

где  $З_{ТС}$  – заработная плата по окладу, руб.;

$З_{допл}$  – доплаты и надбавки (коэффициент премии) , руб.( 50%);

$З_{р.к.}$  – районная доплата, руб. (30%);

$F_d$  – количество рабочих дней в месяце (26 при 6-дневной рабочей неделе), раб. дн.

Значения расчётов основной заработной платы приведены в табл. 9.6.

Таблица 9.6.

## Основная заработная плата исполнителей

Работники	Заработная плата по окладу руб.	Доплаты и надбавки, руб. (50%)	Районная доплата, руб. (30%)	Зарплата месячная, руб.	Средняя заработная плата в день, руб.	Продол. работ, раб. дн.	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	33600	16800	10080	60480	2326,15	8	18609,23
Проектировщик	15000	7500	4500	27000	1038,46	72	74769,23
Итого З <sub>осн</sub> , руб.							<b>93378,46</b>

Расчет дополнительной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$З_{\text{доп}} = 93378,46 \cdot 0,15 = 14006,77 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{зп}} = 93378,46 + 14006,77 = \mathbf{107385,23 \text{ руб.}}$$

Значения расчётов дополнительной и полной заработной платы приведены в табл. 9.7.

Таблица 9.7.

## Дополнительная и полная заработная плата

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Полная заработная плата, руб.
Руководитель	0,15	18609,23	2791,39	21400,61
Проектировщик	0,15	74769,23	11215,38	85984,62
Итого		93378,46	14006,77	107385,23

## Отчисления на социальные нужды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам

государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{соц}} = k_{\text{соц}} (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,302 \cdot (93378,5 + 14006,76) = \mathbf{32430,35 \text{ руб.}}$$

где  $k_{\text{соц}} = 30,2\%$  – коэффициент отчислений на уплату на социальные нужды.

### Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величину накладных расходов примем в размере 16% от общей суммы затрат.

$$\begin{aligned} З_{\text{накл}} &= 0,16 \cdot (З_{\text{зп}} + З_{\text{внеб}}) = \\ &= 0,16 \cdot (107385,23 + 32430,35) = \mathbf{22370,50 \text{ руб.}} \end{aligned}$$

### Затраты на проектирование

Таблица 9.8.

#### Смета расходов на проектирование

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат
1. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	107385,23	66%
2. Отчисления на социальные нужды	32430,35	20%
3. Накладные расходы	22370,50	14%
<b>Итого</b>	<b>162186,08</b>	<b>100%</b>

$$\begin{aligned} З_{\text{проект}} &= З_{\text{зп}} + З_{\text{внеб}} + З_{\text{накл}} = \\ &= 107385,23 + 32430,35 + 22370,50 = \mathbf{162186,08 \text{ руб.}} \end{aligned}$$



### 9.3.2. Затраты на реализацию проекта

#### Определение стоимости оборудования и комплектующих

Таблица 9.9.

Стоимость оборудования и комплектующих.

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, ( $Z_m$ ), руб.
ЭЦН ВНН5-80-2300	шт.	1	800000	800000
Электродвигатель ПЭДН-63-117-2000-25А	шт.	1	200000	500000
Трансформатор ТМПГ-253/3	шт.	1	250000	450000
СУ «Электон-5-ПЧ-ТТПТ-250»	шт.	1	450000	450000
ВКЛ КППБПТ 3х16	м	2400	354	850000
Итого				3050000

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \sum_{i=1}^m C_i N_{\text{рас.}i},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{рас.}i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Стоимость оборудования с учетом транспортных расходов:

$$Z_m = (1 + k_T) \sum_{i=1}^m C_i N_{\text{рас.}i} = (1 + 0,15) \cdot 50000 = 57500 \text{ тыс. руб.}$$

**Определение стоимости специального оборудования и материалов  
для монтажа электрооборудования**

Таблица 9.10..

Стоимость специального оборудования и материалов  
для монтажа электрооборудования.

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Цена, руб.	Итого, руб.
Мегомметр	1	7000	7000
Клещи электроизмерительные	1	3000	3000
Пресс для обжимки наконечников	1	5000	5000
Расходные материалы (гильзы, лента изоляционная и т.д.)	1	35000	35000
Итого			50000

**Стоимость монтажа**

Монтаж электропривода УЭЦН включает в себя:  
подготовку нефтяной скважины к спуску установки ЭЦН,  
подготовку электродвигателя и высоковольтной кабельной линии,  
спуск в скважину электродвигателя с насосом, высоковольтного кабеля  
и колонны труб НКТ до необходимой глубины,  
обвязку фонтанной арматуры (в том числе герметизацию кабельного  
ввода),  
установку и подключение наземного электрооборудования.

Все выше перечисленное является сложным и трудоемким процессом,  
который занимает время от одних суток и больше.

Поэтому стоимость установки и монтажа электропривода УЭЦН очень  
высокая – примем 1 500 000 руб.

## Формирование сметы реализации технического проекта

Определение затрат на технический проект приведен в табл. 9.11.

Таблица 9.11.

### Смета реализации технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат
1. Стоимость оборудования и комплектующих	3050000	66%
2. Стоимость специального оборудования и материалов для монтажа электрооборудования	57000	1%
3. Стоимость установки и монтажа электропривода	1500000	33%
<b>Итого</b>	<b>4607000</b>	<b>100%</b>

Из табл. 5 и табл. 8 видим, что минимальная стоимость электропривода и его разработка обойдется в  $(162186,08 + 4607000) = 4769186,08$  рублей. Это сумма, которая будет представлена заказчику, как основа для формирования бюджета затрат проекта. Стоимость разработки проекта составляет примерно 3,4% от этой суммы, которая при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технического проекта.

## 9.4. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности :

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Для определения ресурсоэффективности проекта по проектированию электропривода УЭЦН с частотным преобразователем рассмотрим критерии, отображенные в табл. 9.12 и сравним их для приводов другого исполнения.

Таблица 9.12.

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	ЭП с системой «ПЧ-АД»	ЭП с плавным пуском	ЭП с прямым пуском
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	3	1
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4	3
3. Помехоустойчивость	0,15	4	4	5
4. Энергосбережение	0,20	5	4	2
5. Надежность	0,25	4	4	5
6. Материалоемкость	0,15	5	4	3
ИТОГО	1	4,6	3,9	3,2

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности для ЭП с системой «ПЧ-АД»:

$$I_{p1} = 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 4,6.$$

Для ЭП с плавным пуском:

$$I_{p2} = 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,9.$$

ЭП с прямым пуском:

$$I_{p3} = 0,1 \cdot 1 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 2 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 3 = 3,4.$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности и энергосбережения позволяют судить о надежности системы.

В данном разделе были рассмотрены и раскрыты следующие вопросы:

- произведен SWOT – анализ, который выявил, что сильных сторон у проекта гораздо больше, чем слабых, а это показывает о перспективности проекта ЭП с системой «ПЧ-АД». Угрозы также имеют вероятности, но низкие, что говорит о высокой надежности проекта;

- разработан график занятости для исполнителей, составлена диаграмма продолжительности работ, позволяющая скоординировать работу исполнителей;

- рассчитана смета затрат на выполнение технического проекта, которые составили 4,77 млн. руб., в том числе на проектирование в размере 3,4% от общих затрат (162186,08 руб.), которые включают в себя заработную плату проектировщикам, расходы на социальные и дополнительные расходы;

- определен показатель ресурсоэффективности проекта, который имеет высокое значение – 4,6 (по 5 - балльной шкале) по сравнению с другими проектами.

## **10. Социальная ответственность**

В данной работе рассчитан частотно регулируемый электропривод нефтяной скважинной установки ЭЦН. Особенностью данной установки в плане рассматриваемой темы является подъем на поверхность жидкостей, содержащие пожароопасные компоненты – нефть и газ. Которые в свою очередь являются загрязняющим фактором для экологии.

В состав данного электропривода входят станция управления, повышающий напряжение трансформатор, высоковольтные двигатель и питающий его кабель. Наличие высокого напряжения создает дополнительный опасный фактор для здоровья работников.

Также неблагоприятные факторы определяются расположением оборудования электропривода. Как правило, станция управления и трансформатор расположены под открытым небом. Поэтому климатические условия работы соответствуют местоположению нефтяных скважин.

### **10.1. Производственная безопасность**

#### **10.1.1. Анализ вредных факторов при разработке и эксплуатации электропривода УЭЦН**

Выделяются следующие неблагоприятные факторы согласно ГОСТ 12.0.003-2015 (Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы.):

- неблагоприятные условия климата;
- недостаточное освещение;
- повышенный уровень шума;
- загазованность.

**Неблагоприятные условия климата** на рабочем месте объясняются расположением электрооборудования на открытом воздухе или в небольших боксах без обогрева. Проблемы возникают, как правило, в холодное время года, которое в некоторых регионах длится более восьми месяцев.

Охлаждение человека, как общее, так и локальное способствует изменению его двигательной активности, нарушает координацию и способность выполнять точные операции; вызывает тормозные процессы в коре головного мозга, способствует развитию патологии.

"МР 2.2.7.2129-06. 2.2.7. Физиология труда и эргономика. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях. Методические рекомендации" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19.09.2006) устанавливают гигиенические требования к режиму работ в холодный период года на открытой территории или в неотапливаемом помещении. Также регламентирует время непрерывного пребывания на холоде и продолжительность обогрева в целях нормализации теплового состояния человека. [14]

В основу разработки требований к режиму работы положены критерии допустимой степени охлаждения человека, одетого в комплект средств индивидуальной защиты от холода, и сведения о скорости нормализации теплового состояния человека в обогреваемом помещении.

На основании данных рекомендаций в определенных промышленных отраслях для отдельных видов профессий разрабатываются отраслевые документы.

В рекомендациях приводятся сведения о воздействии низких температур на организм человека и его реакции. На основании этого устанавливается время разового пребывания на холоде или периодических с перерывами на обогрев.

Приводятся требования к теплоизоляции комплекта СИЗ и его составляющих (головной убор, рукавицы, обувь) для различных климатических регионов.

Таблица 10.1.

**ТРЕБОВАНИЯ  
К ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ КОМПЛЕКТА СИЗ ОТ ХОЛОДА**

Климатический регион (пояс)	Средняя температура воздуха зимних месяцев, °С	Наиболее вероятная скорость ветра в зимние месяцы, м/с	Должная величина теплоизоляции комплекта СИЗ X в реальных условиях его использования, I , м <sup>2</sup> x °С/Вт, к	Должная величина теплоизоляции комплекта СИЗ X в относительно спокойном воздухе, I , м <sup>2</sup> x °С/Вт, к при воздухопроницаемости внешнего слоя одежды, дм <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> x с			
				10	20	30	40
IA (особый)	-25	6,8	0,513	0,669	0,714	0,764	0,823
IB (IV)	-41	1,3	0,681	0,744	0,752	0,759	0,767
II (III)	-18	3,6	0,442	0,518	0,534	0,551	0,569
III (II)	-9,7	5,6	0,360	0,451	0,474	0,500	0,528

Таблица 10.2.

**ТРЕБОВАНИЯ  
К ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ГОЛОВНЫХ УБОРОВ, ОБУВИ И РУКАВИЦ  
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ (ПОЯСОВ)**

Климатический регион (пояс)	Теплоизоляция <*>, м <sup>2</sup> x °С/Вт (не менее)		
	головного убора	обуви	рукавиц
IA (особый)	0,397	0,437	0,497
IB (IV)	0,447	0,572	0,551
II (III)	0,329	0,422	0,403
III (II)	0,295	0,332	0,377
<*> Измеренная в относительно спокойном воздухе.			

Расположение оборудования на открытой территории приводит к **недостатку освещения** в темное время суток, так как обеспечить достаточное освещение сложнее, чем в помещении.

Нефтяные промыслы освещаются, как правило, с прожекторных мачт, поскольку требования техники безопасности не позволяют размещать светильники ближе определенного расстояния. Поэтому освещение должно соответствовать требованиям СП 52.13330.2016, во избежание вреда здоровью, поскольку недостаток освещения приводит к быстрой



утомляемости организма и различными заболеваниями, и травматизму в результате перемещений и усталости.

Горизонтальную освещенность площадок предприятий в точках ее минимального значения на уровне земли или дорожных покрытий следует принимать по табл.10.3. [15]

Т а б л и ц а 10.3.

Освещенность территорий предприятий

Освещаемые объекты	Наибольшая интенсивное». движения в обоих направлениях, сд/ч	Минимальная освещенность в горизонтальной плоскости, лк
I	2	3
Проезды	Св. 50 до 150	3
	От 10 » 50	2
	Менее 10	1
Пожарные проезды, дороги для хозяйственных нужд	—	0,5
Пешеходные и велосипедные дорожки	Св. 100	2
	От 20 до 100	1
	Менее 20	0,5
Ступени и площадки лестниц и переходных мостиков	—	3
Предзаводские участки, не относящиеся к территории города (площадки перед зданиями, подъезды и проходы к зданиям, стоянки транспорта)		2
Переходы и переезды	—	6

Дополнительное освещение должно быть размещено так, чтобы освещало оборудование и не слепило ни на рабочем месте, ни во время переходов.

Размещение рядом на одной площадке нескольких станций управления и трансформаторов приводит к **увеличению уровня шума**, иногда превышающему допустимый.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты.

Согласно «Санитарно эпидемиологическим требованиям к физическим фактора на рабочих местах» допустимый уровень шума на производственных площадках в пределах 80 дБА. [16]

Для сохранения слуха и здоровья работников разрабатываются инструкции на основании требований данного СНиП, согласно которым регламентируется максимальное время нахождения работников в зоне повышенного шума в течение смены. Также инструкциями предписывается использование индивидуальных средств СИЗ – наушники звукоизолирующие и беруши.

Неисправности технологического оборудования скважин и узлов сбора и подготовки нефти приводят к утечкам нефти и газа. Что в критических ситуациях может привести к **загазованности** территории.

Таблица 10.4.

Свойства обращающихся веществ производств, их характеристика, характер воздействия на организм человека [17]

№ пп	Продукция скважин	Характер воздействия на организм человека	ПДК р.з., мг/м <sup>3</sup>	Класс опас- ности	Группа производственных процессов по санитарной характеристике (СП 44.13330.2011)
1	Нефть, Нефтяной газ	Общетоксичный, сенсibiliзирующий. Возможно отравление парами летучих составляющих.	300	IV	2г

Продукты испарений нефти и нефтяной газ при воздействии на человека оказывают токсическое действие, что может привести к отравлению и тяжелым последствиям. Также в небольших концентрациях газ может привести к помутнению сознания и, вследствие этого, к физическим травмам.

Для защиты устанавливаются датчики загазованности, регламентируются правила проведения работ на газоопасных участках. Работники в обязательном порядке оснащаются индивидуальными фильтрующими противогазами и портативными дыхательными устройствами. Проводятся инструктажи действий работников в случае загазованности территории.

### **10.1.2. Анализ опасных факторов при разработке и эксплуатации электропривода УЭЦН**

Электропривод УЭЦН состоит из станции управления, трансформатора, электродвигателя и кабельных линий. Не имеет движущихся крупных частей и открытых нагревательных элементов и не представляет механической и термической опасностей.

Но содержит токоведущие части, находящиеся под высоким напряжением, которые при неправильной эксплуатации представляют серьезную опасность для здоровья работников.

Поэтому к монтажу и обслуживанию электропривода допускаются только те работники, которые прошли специальное обучение и имеют допуск по электробезопасности.

Также учитываются все требования ПУЭ и промышленной безопасности при установке оборудования и прокладке кабельных линий, такие, на пример, как – заземление всех частей электропривода, размещение станции управления и трансформатора на необходимом расстоянии от скважин, обязательная укладка высоковольтных кабельных линий на эстакаду в лотки.

Для безопасной эксплуатации оборудования проводятся периодические осмотры кабельных линий и трансформатора. Примерно раз в год происходит подъем и замена электродвигателя для ревизии.

Для исключения накапливания статического напряжения на корпусах станции управления и трансформатора последние, как правило, размещаются на заземленных технологических металлических площадках с которыми имеют непосредственный контакт через общее заземление.

Молниезащита выполняется согласно "Инструкции по устройству молниезащиты зданий и сооружений" с помощью молниеотводов, размещенных по периметру кустовой площадки со скважинами. На каждый молниеотвод составляется паспорт, в котором отображаются параметры

молниевывода, заземляющего устройства и сроки проверки сопротивления заземления.

## **10.2. Экологическая безопасность**

Нефть имеет сложный химический состав и представляет собой смесь углеводородных и других соединений. Основные составляющие нефти — метановые, наftenовые и ароматические углеводороды, содержащие от 5 до 17 атомов углерода. Главными элементами в составе нефти являются углерод (до 87%) и водород (до 14%). Среди других компонентов в составе нефти присутствуют сера (до 6%), азот (до 0.3%), кислород (до 3%). В малых количествах в нефти содержатся тяжелые металлы и другие элементы. В нефти могут быть растворены различные газы органического и неорганического происхождения. [18]

**Основными загрязнителями** окружающей среды при технологических процессах нефтедобычи являются: нефть и нефтепродукты, сернистые и сероводородсодержащие газы, минерализованные пластовые и сточные воды нефтепромыслов и бурения скважин, шламы бурения, нефте- и водоподготовки и химические реагенты, применяемые для интенсификации процессов нефтедобычи, бурения и подготовки нефти, газа и воды.

Как уже выше указывалось при неисправности фонтанной арматуры, нефтепроводов, блоков подготовки нефти и др. происходят утечки нефти и газа. При попадании в атмосферу нефтяной газ и вещества из нефти образуют токсичную смесь с воздухом. Некоторые элементы могут переноситься на несколько километров от источника. Зараженный воздух вреден как для организмов людей и животных, так и для окружающей растительности. В таких местах ощущаются неприятные запахи, тяжело дышать, растительность вялая и имеет неестественный цвет. Засоряют атмосферу также и продукты сгорания нефти и газа, на пример — факельные установки, и устройства, работающие на продуктах сгорания полученных из

нефти – дизельные и бензиновые двигатели. Большие объемы продуктов сгорания и утечек газов усиливают парниковый эффект, что значительно влияет на климат.

Попадание нефти на землю приводит к загрязнению почвы. Токсичные элементы и минералы, содержащиеся в нефти, губят растительность и микроорганизмы, тяжелые парафины образуют непроницаемую пленку. Проникновение нефти может достигать нескольких десятков сантиметров в глубину, уничтожая плодородный слой почвы. Восстановление растительности, как правило, происходит только через несколько лет.

При смыве нефти и ее продуктов загрязняются и подземные источники, которые разносят загрязненные воды на большие расстояния, охватывая огромные площади.

В настоящее время применяют следующие методы ликвидации нефтяных загрязнений водных объектов:

- механические,
- физико-химические,
- химические,
- биологические.

К механическим относятся различные методы сбора нефти с водной поверхности, начиная от ручного вычерпывания нефти до машинных комплексов нефтемусоросборщиков. Первоначально должно быть осуществлено концентрирование и ограждение находящейся на водной поверхности нефти при помощи плавающих бонов.

К физико-химическим следует отнести, в первую очередь, применение адсорбирующих материалов: пенополиуретан, угольная пыль, резиновая крошка, древесные опилки, пемза, торф, торфяной мох и т.п.

Адсорбенты органического и неорганического происхождения перед применением могут гранулироваться (порошкообразные) и пропитываться гидрофобизаторами.

Технология применения заключается в распылении их на нефтяную пленку. Перспективно применение гранулированных адсорбентов и жидкостей, обладающих магнитными свойствами, которые после адсорбции нефти легко удаляются магнитом.

Удаление нефти с помощью химических соединений – детергентов – нашло применение при разливах нефти на море. К детергентам относятся растворители и ПАВ, способствующие образованию эмульсий.

Для некоторых бактерий нефть является питательной средой. Микробиологическая активность в большей степени зависит от температуры: скорость микробиологических процессов удваивается при увеличении температуры на 10°C. На развитие микроорганизмов большое влияние оказывает содержание высоколетучих алифатических компонентов нефти. Введение в воду незначительных количеств нитратов и фосфатов увеличивает степень разрушения нефти на 70%.

Оценка степени загрязненности почв и методы их очистки разработаны гораздо слабее, чем для воды. Механическая очистка почв и вод считается трудоемкой, связана со значительными экономическими затратами. По имеющимся, хотя и немногочисленным данным, перспективными могут оказаться микробиологические методы.

### **10.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Ситуации, которые являются чрезвычайными, создаются на стадии установки и монтажа электропривода УЭЦН и в процессе последующей эксплуатации электрооборудования.

Составим перечень возможных таких ситуаций:

- розлив нефти и раствора глушения при подготовке скважины или спуске установки УЭЦН;
- возгорание разлившейся нефти;

- повреждение высоковольтной кабельной линии, питающий двигатель ЭЦН, при спуске установки УЭЦН;
- снижение сопротивления изоляции УЭЦН при пуске ЭЦН или в процессе последующей эксплуатации;
- утечки газа через негерметичный кабельный ввод или по внутренней поверхности брони кабельной линии;
- отказ телеметрической системы «Электрон-ТМС-3»;
- аварийный останов УЭЦН по защитах станции управления;
- заклинивание насосной установки.

Рассмотрим типичную чрезвычайную ситуацию, когда происходит аварийный останов по причине заклинивания установки из-за отложений тяжелых парафинов. В таком случае на табло станции управления высвечивается надпись "ПЕРЕГРУЗ". Представитель организации, ответственной за обслуживание УЭЦН, проверяет сопротивление изоляции трансформатора, кабельной линии до клеммной коробки возле скважины и двигателя с кабельной линией в скважине. По результатам измерений принимается решение – при удовлетворительном сопротивлении изоляции производится повторный пуск. Если запуск не произошел по причине перегруза, принимается решение срывать насос с «клина». Тогда, как правило, подключают станцию управления большей мощности с прямым пуском, или в установках ставят пуск без разгона и увеличивают уставку по току. При удачном пуске и срыве с «клина», меняют обратно параметры запуска и уставки или переключают на прежнюю станцию управления. При неудачном пуске, через определенное время (для охлаждения двигателя) производят повторный запуск или принимают решение о подъеме и замене установки.

Для предупреждения и предотвращения ЧС разрабатываются регламенты проведения работ (например: ПЛАС – план ликвидации аварийных ситуаций), в которых прописываются условия и порядок

проведения работ, и действия в случаях чрезвычайных ситуаций. Проводятся вводные, целевые, первичные и повторные инструктажи по охране труда. Разрабатываются планы ликвидации аварийных ситуаций, проводятся регулярные тренировки. Принимаются технические и организационные мероприятия по предотвращению ЧС, на пример:

для предотвращения нарушений в процессе выполнения работ назначается ответственный руководитель, в обязанность которого входит непосредственный контроль производимых работ;

кабельные линии в обязательном порядке размещаются на эстакадах в лотках для недопущения их повреждения и исключения поражения электрическим током;

возле скважины в разрыв кабельной линии, питающей УЭЦН, ставят клеммную коробку для предотвращения попадания газа по кабелю в станцию управления или в помещение, где она находится;

проводятся плановые осмотры и текущие ремонты согласно графика ППР.

#### **10.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Правовое регулирование в области промышленной безопасности осуществляется настоящим Федеральным законом, другими федеральными законами и иными нормативными актами Российской Федерации в области промышленной безопасности (трудовой кодекс и др.).

Так как нефте-газодобывающие производства относятся к опасным, то на рабочих местах жестко контролируется соблюдение правил техники безопасности и охраны труда. В организациях, выполняющих работы в этих отраслях, создаются отделы по охране труда и технической безопасности.

Основными задачами службы охраны труда являются:

- Организация и координация работы по охране труда на предприятии
- Контроль за соблюдением законодательных и иных нормативных правовых актов по ОТ работниками предприятия



- Совершенствование профилактической работы по предупреждению производственного травматизма, профессиональных и производственно-обусловленных заболеваний и улучшению условий труда
- Консультирование работодателя и работников по вопросам охраны труда.

Таблица 10.5.

Перечень обязательной нормативно-технической документации (17)

№ п/п	Наименование нормативно-технической документации	Индекс
1	Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности	ПБНГП приказ от 12.03.2015г. №101
2	Правила устройства электроустановок	ПУЭ
3	Технологическое оборудование и технологические трубопроводы	СНиП 3.05.05-84
4	Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок	Приказ Минтруда России от 24.07.2013 N 328н (ред. от 19.02.2016)
5	Нормы технологического проектирования объектов сбора, транспорта, подготовки нефти, газа и воды нефтяных месторождений	ВНТП 3-85
6	Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности	НПБ 105-2003 (СП12.13130.2009)
7	Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств	ПБ 09-540-03
8	Правила противопожарного режима в Российской Федерации	ППР 2012
9	Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов.	РД 39-132-94
10	Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности	ППБ0-85
11	Федеральный закон «о промышленной безопасности»	116-ФЗ
12	Инструкция по безопасности одновременного производства буровых работ, освоения и эксплуатации скважин на кусте.	РД 08-435-02
13	Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением	ПБ 03-276-03

Эти отделы на основании государственных нормативных правовых актах составляют инструкции по безопасному выполнению работ, регламенты взаимоотношений между различными структурами, правила поведения и др. и следят за их соблюдением работниками организации. Также в обязанности отделов входит контроль за соответствие специальностей работников выполняемой работе. Проверка их знаний и их последующее обучение.

Контроль за работой таких отделов находится в ведении федерального органа исполнительной власти (Ростехнадзор).

## 11. Заключение

В начале данной работы описан технологический процесс добычи нефти при помощи установки с электроцентробежным насосом, кратко рассмотрены задачи составляющих частей УЭЦН. Далее представлен пример «ручного» расчета и подбора электроцентробежного насоса для нефтяной скважины. И выполнена основная часть работы - произведен расчет электропривода для ЭЦН.

В ходе расчетов выбран электродвигатель из расчета обеспечения наилучшего КПД при максимальном напоре в полосе рабочих частот. Рассчитаны и построены естественные и регулировочные характеристики, подтверждающие этот выбор. Также построены характеристики с учетом IR-компенсации (падения напряжения на активном сопротивлении двигателя).

На основании рассчитанных параметров схемы замещения смоделированы переходные процессы в среде Matlab Simulink, при прямом пуске, с преобразователем частоты и с учетом IR-компенсации.

В разделе, посвященном экономике, проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения разработки электропривода с частотным регулятором с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. В рамках этой оценки проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков, угроз и возможностей, их количественный состав и сделана оценка целесообразности его разработки. Также произведен анализ потребителей данной разработки в выбранном сегменте рынка. Сделан сравнительный расчёт затрат на проектирование электропривода и расходов на его реализацию.

В рамках социальной безопасности рассмотрены вопросы влияния опасных и вредных факторов, возникающих в связи с разрабатываемым проектом, его реализацией и дальнейшей эксплуатацией, на организм человека и окружающую его среду. Экологические аспекты в сферах внедрения разработок. Составлен перечень чрезвычайных ситуаций в

процессе монтажа и эксплуатации разрабатываемого электропривода, а также указаны меры для предотвращения этих ситуаций, и ликвидации последствий, если они все же произошли.

В итоге можно сказать, что, не смотря высокую стоимость, электроприводы с частотным регулированием будут развиваться дальше. Возможность скалярного и векторного управления дает возможность получить требуемый результат с меньшими затратами материалов и энергии. Развитие микропроцессорных систем и электроники позволяет контролировать практически все процессы и текущие параметры привода и изменять их в режиме реального времени. Развитие новых технологий и их внедрение в будущем позволит снизить стоимость оборудования для электроприводов.

## 12. Список литературы

1. Ивановский В.Н., Даришев В.И., Каштанов В.С., Мерециди И.А., Николаев Н.М., Пекин С.С., Сабиров А.А. Нефтегазопромысловое оборудование. — М: ЦентрЛитНефтеГаз, 2006. — 720 е.: ил.
2. Ивановский В.Н., Даришев В.И., Сабиров А.А., Каштанов В.С., Пекин С.С. Скважинные насосные установки для добычи нефти. — М: ГУП Изд-во, 2002. — 824 е.: ил.
3. Интернет ресурс: <http://www.novomet.ru/rus/products/pumps/>.
4. Каталог ОАО «Новомет». — Пермь: ОАО «Новомет», 2001.
5. ПЧ-ТТПТ- -380-50-1 УХЛ1, РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦТКД017 РЭ ЗАО "ЭЛЕКТОН", ЗАТО г. Радужный Владимирской обл. 2013г.
6. Каталог справочник электротехнической продукции.
7. Правила установки электрооборудования.
8. Фаттахов К. М., Фаттахов Р. К. О проведении расчета сопротивлений асинхронной машины // Нефтегазовое дело: электрон, науч. журн. 2015. № 3. С. 679-692. <http://vvwvv.ogbus.ru>.
9. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. М.: Энергия, 1965. Т. 2. 704 с.
10. Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.
11. Проектирование электрических машин / Под ред. П. С. Сергеева. М.: Энергия, 1969. 632 с.
12. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс и СПб.: Питер, 2008. - 288 с.: ил.
13. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Се-рикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына и п, Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского.

14. МР 2.2.7.2129-06. 2.2.7. Физиология труда и эргономика. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях. Методические рекомендации.

15. СП 52.13330.2016, естественное и искусственное освещение,.

16. СанПиН 2.2.4.3359-16, «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».

17. Технологический регламент по эксплуатации фонда скважин в процессе добычи углеводородного сырья Фестивального месторождения.

18. М.Б. Полозов Учебно-методическое пособие «Экология нефтегазодобывающего комплекса». – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012 г.